

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DETECÇÃO DE CAVITAÇÃO EM VÁLVULAS DE CONTROLE VIA  
ANÁLISE ESTATÍSTICA DE SINAIS ACÚSTICOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ALEXANDRE ARAUJO PAES**

**VITÓRIA – ES  
DEZEMBRO /2016**

**ALEXANDRE ARAUJO PAES**

**DETECÇÃO DE CAVITAÇÃO EM VÁLVULAS DE CONTROLE VIA  
ANÁLISE ESTATÍSTICA DE SINAIS ACÚSTICOS**

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, como um dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Prof. Dr. Celso José Munaro

**Coorientador:** Prof. Dr. Patrick Marques Ciarelli

**VITÓRIA – ES  
DEZEMBRO/2016**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Tecnológica,  
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

P126d Paes, Alexandre Araujo, 1974-  
Detecção de cavitação em válvulas de controle via análise estatística de sinais acústicos. / Alexandre Araujo Paes. – 2016. 67 f. : il.

Orientador: Celso José Munaro.  
Coorientador: Patrick Marques Ciarelli.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Cavitação. 2. Estatística – Análise. 3. Máquina de vetores de suporte. 4. Emissão acústica – Medição. 5. Diagnóstico. 6. Métodos estatísticos. 7. Cartas de Shewhart. I. Munaro, Celso José. II. Ciarelli, Patrick Marques. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

---

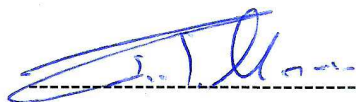
**ALEXANDRE ARAUJO PAES**

**DETECÇÃO DE CAVITAÇÃO EM VÁLVULAS DE CONTROLE VIA  
ANÁLISE ESTATÍSTICA DE SINAIS ACÚSTICOS**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 6 de dezembro de 2016.

**COMISSÃO EXAMINADORA**



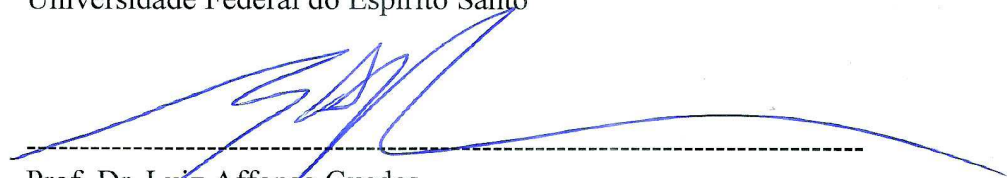
Prof. Dr. Celso José Munaro  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador



Prof. Dr. Patrick Marques Ciarelli  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Co-orientador



Prof. Dr. João Luiz Marcon Donatelli  
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Luiz Affonso Guedes  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos  
(Provérbios 16:3).

## **DEDICATÓRIA**

Ao meu grande DEUS que me sustenta e me sustentou nesta grande jornada da minha vida e neste importante passo que há de se concretizar, pois as minhas conquistas são para honra e glória do Seu Santo Nome.

A minha esposa e filhos pelo apoio, incentivo e oração em relação os meus estudos e privação da minha companhia nos momentos despendidos na dedicação de uma meta a cumprir. Aos meus pais e irmãos que ajudaram a formar a pessoa que sou.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor e orientador desta dissertação Dr. Celso J. Munaro, por sua paciência, dedicação e disposição em ajudar, através da disponibilidade de tempo e de suas dicas valiosas para conclusão desta dissertação.

Ao Professor e coorientador desta dissertação Dr. Patrick M. Ciarelli que se dispôs a colaborar e participar na troca de ideias contribuindo de forma consistente.

Ao engenheiro Fernando Tadeu, experiente profissional no campo de válvulas de controle, que se dispôs a discutir sobre a relevância deste trabalho na aplicação em processos industriais.

Aos colegas de laboratório do LCI : Oscar, Vinicius, Marcos e dentre outros que de alguma forma contribuíram para superação deste desafio.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Curvas de equilíbrio estático das bolhas esféricas e definição das curvas críticas. Exemplo dado para bolhas de 1, 2, 5, e 10 $\mu\text{m}$ inicialmente em equilíbrio na pressão de 1 atm. Fonte: Ki,H.K., et al.(2013, p. 8). .....	19
Figura 2.2 – Ilustração do desenvolvimento do jato reentrante durante o colapso de uma bolha próximo a parede rígida plana. Bolhas geradas por centelhas usando uma descarga de condensador de 16 kV em tanque de baixa pressão. Fonte: (Ki,H.K., et al., 2013, p. 11). .....	21
Figura 2.3 - Esboço de modelo de Cavitação em NURICK (1976) .....	24
2.4 - Regiões dos regimes de cavitação e seus limite de acordo com a ISA. ....	26
Figura 3.1 – Representação gráfica da carta de Shewhart. ....	28
Figura 3.2 – Separação linear do classificador binário entre pontos circulares e losangos. Fonte: (SCHÖLKOPF e SMOLA, 2002, p. 12) .....	31
Figura 4.1- Foto da planta piloto usada nos ensaios. ....	37
Figura 4.2- Detalhe da instalação dos transdutores de pressão; em um a montante e em dois a jusante da válvula, e o microfone de eletreto em três. ....	38
Figura 4.3- Resultado dos dois ensaios, variando a abertura da válvula e variando a frequência entregue a bomba. ....	40
Figura 4.4 - Variação dos momentos estatísticos do sinal de pressão a jusante nas regiões de cavitação (abertura da válvula < 30%) e não cavitação (abertura da válvula $\geq$ 30%). ....	43
Figura 4.5 - Variação dos momentos estatísticos do sinal de emissão acústica nas regiões de cavitação (abertura da válvula < 30%) e não cavitação (abertura da válvula $\geq$ 30%). ....	44
Figura 4.6 – Densidade espectral de potência do sinal de emissão acústica para os pontos de operação de 10, 20, 30, 50 e 70% de abertura da válvula. ....	45
Figura 4.7 - Carta de Shewhart sobre o sinal. ....	47
Figura 4.8 - Espaço característico do desvio padrão versus fator forma. Aberturas com 35 e 30% não possuem cavitação, e menores que 27% há presença de cavitação. ....	48



Figura 4.9 - SVM usando as funções classificadoras RBF Gaussiana e linear; ensaio variando abertura da válvula e fixa a frequência da bomba em 60 Hz.....	49
Figura 4.10 - SVM usando as funções classificadoras RBF Gaussiana e linear; ensaio variando a frequência entregue a bomba e abertura da válvula fixada em 10%.50	
Figura 4.11 - Precisão e sensibilidade para CS e SVM para o ensaio onde a abertura da válvula variou e a velocidade da bomba foi fixada em 3460 rpm (60 Hz).....	51
Figura 4.12 - Medida F1 e acurácia para CS e SVM para o ensaio onde a abertura da válvula variou e a velocidade da bomba foi fixada em 60 Hz.....	51
Figura 4.13 - Precisão e sensibilidade para CS e SVM para o ensaio onde a frequência entregue à bomba foi variada e a abertura da válvula fixada em 10%. ....	52
Figura 4.14 - Medida F1 e acurácia para CS e SVM para o ensaio onde a frequência entregue à bomba foi variada e a abertura da válvula fixada em 10%. ....	52
Figura 4.15 - Índice signa para cada ponto de operação com a válvula operando me malha aberta em duas temperaturas de trabalho. ....	54
Figura 4.16 – Influência da temperatura no cálculo do índice de cavitação $\sigma_c$ .....	55
Figura 5.1 - Malha de vazão para diferentes referências com controle via válvula ....	57
Figura 5.2- Monitoramento dos sinais de EA e abertura da válvula com o processo operando em malha fechada. ....	58
Figura 5.3 - Relação entre abertura e desvio padrão da EA. ....	59
Figura 5.4 - Modelo ajustado via regressão linear e intervalo de confiança. ....	60
Figura 5.5 - Avaliação do uso do modelo e de seu intervalo de confiança para detectar cavitação.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Funções núcleos mais comumente utilizadas.....	34
Tabela 4.1 - Parâmetros considerados para as métricas .....	39

## SUMÁRIO

	<b>DEDICATÓRIA.....</b>	<b>vi</b>
	<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>v</b>
	<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>vi</b>
	<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>viii</b>
	<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>ix</b>
	<b>RESUMO.....</b>	<b>xi</b>
	<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xi</b>
	<b>QUADRO SÍNTESE DO TRABALHO.....</b>	<b>xii</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO. ....</b>	<b>13</b>
	1.1 Custo associado aos danos causados pela cavitação.....	14
	1.2 Motivação.....	14
	1.3 Objetivo e organização do trabalho .....	15
	1.4 Estrutura do trabalho.....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>18</b>
	2.1 Cavitação.....	18
	2.1.1 Pressão crítica dos núcleos das bolhas .....	18
	2.1.2 Cavitação Erosiva.....	20
	2.1.3 Diagnosticar e monitorar a cavitação. ....	22
	2.2 Estimar o nível de cavitação sobre a válvula de controle através de parâmetro adimensional. ....	23
	2.3 Prática recomendada .....	25
<b>3</b>	<b>TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE FALHAS APLICADAS A CAVITAÇÃO.....</b>	<b>27</b>
	3.1 Cartas de Shewhart .....	27
	3.2 Máquina de vetores suporte (SVM).....	28
	3.2.1 Formulação matemática .....	29
	3.2.1.1 Hiperplano classificador linearmente separável.....	29

3.2.1.2	Hiperplano classificador para o SVM não linear .....	32
3.2.1.3	Hiperplano com margem flexível.....	33
3.2.1.4	Função <i>kernel</i> .....	33
3.2.1.5	Treinamento do SVM.....	34
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO.....</b>	<b>36</b>
4.1	Planta piloto .....	36
4.2	Índices de desempenho usados para comparar métodos.....	38
4.3	Ensaio em malha aberta com dados coletados a 25 kHz.....	39
4.3.1	Análise dos dados coletados.....	40
4.3.2	Potencial da sensibilidade dos momentos estatísticos ao fenômeno de cavitação. ....	41
4.3.3	Análise espectral sobre o sinal de emissão acústica.....	44
4.3.4	Análise prévia usando cartas de Shewhart e SVM.....	46
4.3.5	Comparação dos resultados.....	50
4.4	Efeito da temperatura sobre a cavitação .....	53
4.4.1	Influência da temperatura na intensificação do fenômeno cavitação.....	53
<b>5</b>	<b>DETECÇÃO DA CAVITAÇÃO PARA DIFERENTES REGIÕES DE OPERAÇÃO.....</b>	<b>56</b>
5.1	Coleta de dados em uma malha de controle de vazão .....	56
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>62</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>64</b>

## RESUMO

A cavitação é um fenômeno físico que traz sérios danos aos internos de válvulas de controle. Seu monitoramento e diagnóstico são de suma importância para evitar a degradação precoce dos equipamentos onde se manifesta. Neste trabalho, os sinais de emissão acústica e de pressão foram avaliados para detectar a cavitação incipiente em uma válvula pneumática de controle atuando em uma malha de controle de vazão de água. Foi observado, através dos dados coletados, que o desvio padrão e o fator forma do sinal de emissão acústica são mais sensíveis à presença de cavitação, e por isso foram utilizados para a detecção do mesmo. Com estas informações, avaliou-se a aplicação das cartas de Shewhart e de Máquina de Vetores Suporte para detectar a cavitação, e os resultados dos dois métodos foram comparados usando quatro métricas de desempenho. A análise destes resultados fornece importantes informações para escolha do método de detecção da cavitação em função da complexidade, disponibilidade de dados e presença de erros de diagnóstico. Por fim, é avaliado o efeito da abertura da válvula no desvio padrão do sinal de emissão acústica, usando apenas dados de normalidade. Para isto, foi proposto um método cujo modelo resultante permite detectar a cavitação usando somente dados de normalidade. A abordagem proposta é relevante, já que, em processos industriais, dados de cavitação são de difícil obtenção.

## ABSTRACT

Cavitation is a physical phenomenon that causes serious damage to control valve's internals. Its monitoring and diagnosis are critical to prevent premature degradation of the equipment where it occurs. In this work, acoustic emission and pressure signals have been evaluated to detect incipient cavitation in a pneumatic control valve operating in a water flow control loop. It has been observed, through of the collected data, that standard deviation and skewness of acoustic emission signal are more sensitive to the presence of cavitation, therefore they were used to detect it. With this information, Shewhart charts and Support Vector Machine methods are used to detect cavitation, and the results of the two methods are compared using four performance metrics. The analysis of these results provides important information for choosing the cavitation detection method depending on the complexity, data availability and presence of false diagnosis. Finally, It is evaluated the effect of valve opening on standard deviation of acoustic emission signal using only normality data. To that end, a method was proposed generating a linear model allows detecting cavitation only using normality data. The approach is relevant since, in industrial process, the cavitation data are hard to get.

## QUADRO SÍNTESE DO TRABALHO

Capítulo	Tema	Objetivo
1	Indução	Descrever de forma sucinta a cavitação e apresentar as relevâncias de pesquisas pertinentes ao fenômeno e expor uma visão geral do trabalho, tal com, sua organização.
2	Cavitação	Descrever o fenômeno de forma mais aprofundada de maneira que o leitor tenha condições de entender como foi estruturado o diagnóstico e descrever a origem do índice adotado pela ISA ao qual será usado como parâmetro de determinação das regiões de cavitação e não cavitação.
3	Técnicas de detecção de falhas aplicada a cavitação	Apresentar as particularidades da carta de Shewhart e máquinas de vetores suporte como ferramentas capazes de detectar o fenômeno.
4	Aplicação	Apresentar a planta piloto usada para os ensaios, descrevê-los, analisar os dados coletados, e com base nesta análise aplicar os algoritmos descrito no capítulo 3, apresentando os resultados de forma comparativa através das métricas adotadas, e por fim, mostrar o efeito da temperatura em 22° C e 37° C sobre o índice adotado pela ISA para vários pontos de operação da válvula ensaiada.
5	Detecção da cavitação para diferentes regiões de operação	Com os conhecimentos adquiridos ao longo da pesquisa, neste capítulo é proposto um algoritmo capaz de detectar a cavitação através do desvio padrão do sinal de emissão acústica juntamente com o sinal da abertura da válvula, usando um modelo de regressão linear e o intervalo de confiança dos parâmetros deste modelo.
6	Conclusão	Expor as informações relevantes alcançadas pertinentes à detecção do fenômeno, e propor tópicos destinados aos trabalhos futuros sobre o tema.

## 1 INTRODUÇÃO.

Um dos mais importantes elementos finais em malhas de controle são as válvulas de controle, pois criam restrição à passagem do fluido tornando possível a modulação das grandezas de interesse ao processo.

Porém, em certas regiões de operação, a restrição necessária à passagem do fluido pode produzir turbulências e regiões de baixa pressão, que em condições termodinâmicas específicas, produzem a vaporização, e, por conseguinte, a condensação súbita do líquido à jusante da válvula.

As bolhas formadas neste processo as quais são submetidas à pressão acima da pressão de vaporização do fluido na região de recuperação de pressão, entram em colapso e implodem. Quando isto acontece próximo às superfícies dos materiais, causa erosão nestas regiões, trazendo degradação precoce (HUBBALLI e SONDUR, 2013). Este fenômeno é conhecido como cavitação erosiva.

Em termos gerais, a cavitação é um problema que tem trazido preocupações aos engenheiros de várias áreas de aplicações, que vai desde engenharia aeroespacial projetando bombas de foguetes até a engenharia civil para estimar a vida útil de vertedouro de usinas hidrelétricas. A cavitação é conhecida, em sua ocorrência, em uma variedade de máquinas de fluidos, incluindo bombas, turbinas, hélices de embarcações, e também, em válvulas. Os problemas comumente encontrados na ocorrência da cavitação são: degradação do desempenho da máquina, ruído sonoro, vibração e erosão.

Euler, no seu livro sobre a teoria das máquinas hidráulicas, 1754, foi provavelmente o primeiro a conjecturar que a cavitação poderia ser um problema. Em 1873, Reynolds apresentou um estudo fundamental sobre cavitação em constrições tubulares. Entretanto, o início da efetiva pesquisa nesta área veio através do estudo de hélices marítima. De fato, R. E. Froude, um arquiteto naval, cunhou o termo Cavitação em torno de 1895 (KIM, *et al.*, 2013, p. vii).

Nota-se, então, que a cavitação é um fenômeno físico que foi descoberto a mais de cem anos, mas que ainda é pesquisado no mundo todo a fim de diagnosticá-lo

e suprimir seus danos, principalmente erosivos.

### **1.1 Custo associado aos danos causados pela cavitação**

Estimar um custo associado com a cavitação não é tarefa fácil, pois além do dano material na própria válvula e tubulações, existem os prejuízos indiretos que são tão ou mais onerosos que a corrosão gerada a partir do fenômeno. Dentre estes se podem citar a perda da eficiência de produção da planta, paradas não programadas, produtos fora das especificações e, em certas situações, danos ambientais e risco a vida dos colaboradores das empresas e dos moradores vizinhos a estes parques industriais.

Portanto a estimação dos custos monetários associado com a cavitação não tem sido bem definida na literatura, mas em BODDÉUS, p. 96, (1999) é apresentado um valor estimado de \$ 3.150.000,00 por ano gastos nas usinas de geração de energia por combustíveis fósseis, na região do Pacífico, devido ao fenômeno de cavitação, e conservativamente apresentou um custo estimado para a Austrália de \$12.600.000,00 por ano. Mesmo sendo dados de mais de uma década e valores defasados, é possível perceber a importância econômica, ambiental e humana das pesquisas relacionadas a este assunto.

### **1.2 Motivação**

A erosão da cavitação envolve a interação entre o fluxo do líquido e as propriedades do material. Sob a ótica do líquido, a cavitação erosiva depende sobretudo da intensidade do fluxo cavitativo, que é definido em termos da frequência e da intensidade dos colapsos das bolhas. Sob a ótica do material, a erosão causada depende, sobretudo, das propriedades do material ao qual rege a resposta das superfícies em detrimento ao fluxo cavitativo. Portanto, a dimensão dos danos causados será o resultado da competição entre a intensidade da cavitação e a resistência do material (KIM, *et al.*, 2013, p. vii) e (FRANC e JEAN-MARIE, 2004, p. 266).



Desta forma, um levantamento do impacto dos danos causados por este fenômeno requer uma análise entre intensidade do fluxo cavitativo, a resistência do material e o tempo de exposição ao fenômeno, mas que, na maioria das vezes, este levantamento não venha a ser possível em uma válvula instalada em campo. Portanto, durante a operação das plantas, as formas indiretas de detecção são mais comumente usadas para monitoramento e diagnósticos da cavitação, ou seja, são efetuadas através dos sinais de emissão acústica (EA) ou vibração, pois, ambas são bem correlacionados com ondas de picos de pressão de altas frequências, causadas imediatamente após o colapso das bolhas.

Na manutenção preditiva tradicional, o monitoramento sobre as válvulas de controle se faz através do uso de sensores, e ou instrumentação específica instalada próxima a este elemento final, e, a partir dos dados coletados, um especialista pode detectar um problema (Fisher Control International, 2005). Quando se trata do fenômeno cavitação, o tempo de detecção é primordial, porém, este tipo de detecção muitas das vezes ocorre de forma tardia, quando a erosão produziu desgaste elevado. Desta forma, a utilização de algoritmos que visem antecipar a detecção do fenômeno é altamente desejável. A avaliação de momentos estatísticos de sinais acústicos é uma abordagem usual para realizar esta detecção (SHUKRI, MUN e IBRAHIM, 2011).

Neste trabalho, um procedimento semelhante ao feito em (ULANICKI, PICINALI e JANUS, 2015) foi utilizado para a coleta de dados. O potencial dos sinais de pressão à jusante e de emissão acústica serão avaliados para suas utilizações na detecção da cavitação através dos algoritmos baseados em máquina de vetores suporte (SVM) e cartas de Shewhart (CS). Além destes dois algoritmos, será apresentada uma nova metodologia de detecção usando apenas dados sem cavitação.

### **1.3 Objetivo e organização do trabalho**

O objetivo deste trabalho é usar as potencialidades de informação do sinal de emissão acústica para detecção da cavitação de forma precoce, evitando assim uma degeneração prematura dos internos das válvulas. Tais potencialidades derivam dos

momentos estatísticos calculados sobre os sinais coletados nos pontos de operação da válvula.

Para atingir este objetivo, os momentos estatísticos relevantes à detecção são usados como parâmetros de entrada para treinamento de dois algoritmos escolhidos, dentre vários disponíveis na literatura. O primeiro, carta de Shewhart, foi escolhido pela sua simplicidade de implementação e sua eficácia comprovada em detecção de anormalidades em diagnósticos univariados. O segundo, máquina de vetores suporte (SVM), clássico algoritmo na área de reconhecimento de padrões, principalmente para tarefas de classificação binária, ou seja, que envolvem duas classes.

E por final, com conhecimento adquirido sobre o assunto, propor um algoritmo capaz de diagnosticar de forma eficiente o fenômeno, treinando-o somente com dados de normalidade, ou seja, região de operação normal da válvula.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

O primeiro capítulo apresentou uma visão geral sobre o assunto e os objetivos que devem ser alcançados. No segundo capítulo é feita uma revisão da literatura sobre o fenômeno de cavitação, descrevendo as formas de prevenção e mitigação dos efeitos, descreve-se as particularidades dos sinais de emissão acústica, as quais permitem inferir o fenômeno. Ainda neste mesmo capítulo, apresenta-se a origem do índice sigma adotado pela ISA, usado em fase de projeto para determinar se as válvulas irão operar na região de cavitação.

No terceiro capítulo são apresentados, com maiores detalhes, os dois algoritmos escolhidos, dando mais ênfase ao SVM, por se tratar de um algoritmo mais complexo na fase de treinamento.

No quarto capítulo, a planta piloto é apresentada e os ensaios de malha aberta são descritos, a fim de assegurar melhor entendimento do processo. Na sequência, são apresentadas as métricas que servirão para comparar os algoritmos na detecção do fenômeno, e discute-se os resultados obtidos pelas cartas de Shewhart e pelo SVM. No

final deste Capítulo, é discutida a influência da temperatura no cálculo do índice sigma.

No quinto Capítulo, através do conhecimento adquirido sobre o sinal de emissão acústica, nos capítulos anteriores, é feito um estudo de aplicação deste sinal, em conjunto com o sinal de abertura da válvula, disponível em processos industriais, a fim de propor um algoritmo capaz de diagnosticar o fenômeno em campo, próximo a este elemento final. A técnica é testada sobre os dados de malha aberta e fechada e no decorrer do Capítulo é descrito, de forma sucinta, como foram feitos os ensaios e a coleta de dados em malha fechada, e por fim, os resultados são discutidos.

Por fim, as conclusões do trabalho e dos resultados obtidos são apresentadas no sexto Capítulo.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A busca do entendimento do fenômeno nos remete as possíveis formas de como diagnosticá-lo e preveni-lo, portanto neste Capítulo apresenta de forma mais ampla o princípio físico que desencadeia a cavitação, de acordo com a literatura atual, bem como, a forma de mensurá-lo segundo a *International Society of Automation* (ISA).

### 2.1 Cavitação

A cavitação é o crescimento acentuado e intenso do colapso dos núcleos das bolhas em fluídos no estado líquido quando exposto a grande variação de pressão. Cada bolha macroscópica origina-se de núcleos microscópicos que são carregados pelo fluxo do líquido, estes crescem na região de baixa pressão, transladam pelo fluído, e entram em colapso em região de recuperação de pressão, dando origem a cavitação, proporcionando um potencial eminente à erosão nas paredes próximas a esta região. Em qualquer tipo de cavitação, a sua ocorrência é fortemente dependente do mínimo de pressão e da temperatura no fluxo (KIM, *et al.*, 2013) e (FRANC e JEAN-MARIE, 2004).

#### 2.1.1 Pressão crítica dos núcleos das bolhas

A formação do fluxo cavitativo passa por um processo de formação das bolhas que, por seguinte, surge a partir das interações das pressões internas e externas destas. Para esta análise, considera-se o núcleo sendo esférico e contendo gás não condensável (proveniente da interação do fluído, em estado líquido, com o ar atmosférico) na pressão parcial  $P_g$  e vapor de líquido na pressão parcial  $P_v$ . Sendo assim, na superfície da bolha aplica-se o balanço entre a pressão interna, a pressão do líquido, e a tensão superficial,

$$P_L = P_v + P_g - \frac{2\gamma}{R} \quad (2.1),$$

onde  $P_L$  é a pressão no líquido,  $\gamma$  é o parâmetro de tensão da superfície, e  $R$  é o raio da bolha (KIM, *et al.*, 2013, p. 7) , (FRANC e JEAN-MARIE, 2004, p. 28) e (BODDÉUS, 1999).

Considerando um equilíbrio quase uniforme, o gás segue a lei de compressão isotérmica, ou seja, não há mudança de temperatura nas transformações termodinâmica, e  $P_g$  é relacionado com os valores iniciais,  $P_{g0}, R_o$ , e para o novo raio da bolha  $R$  através de:

$$P_g = P_{g0} \left( \frac{R_o}{R} \right)^3 \quad (2.2),$$

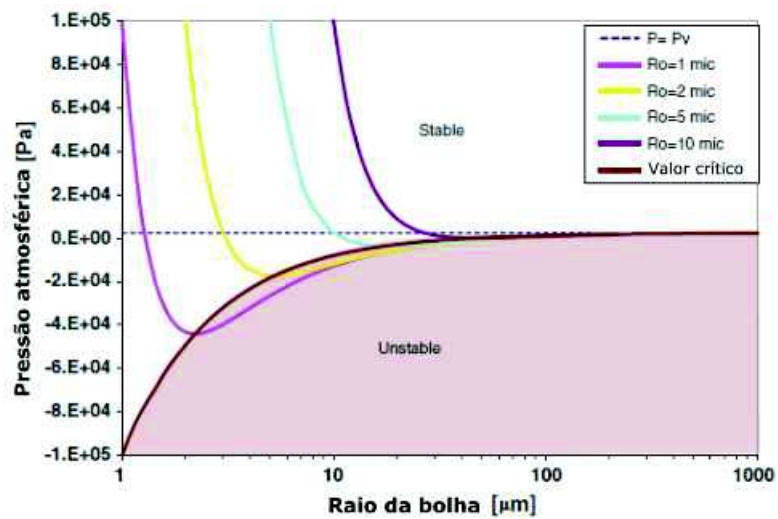


Figura 2.1- Curvas de equilíbrio estático das bolhas esféricas e definição das curvas críticas. Exemplo dado para bolhas de 1, 2, 5, e 10  $\mu\text{m}$  inicialmente em equilíbrio na pressão de 1 atm. Fonte: Ki,H.K., et al.(2013, p. 8).

o balanço das pressões nas paredes da bolha se torna:

$$P_L(R) = P_v + P_{g0} \left( \frac{R_o}{R} \right)^3 - \frac{2\gamma}{R} \quad (2.3),$$

onde a notação  $P_L(R)$  se destina a associar a pressão líquida,  $P_L$ , com o raio da bolha,  $R$ . O equilíbrio da bolha estática pode ser entendido pela consideração da curva  $P_L(R)$ .

Como ilustrado na Figura 2.1, esta curva tem um valor mínimo abaixo do qual não há um raio de bolha equilibrado. Somente a marca da curva do lado esquerdo do mínimo corresponde ao estado de equilíbrio.

Resolvendo para o valor mínimo de  $P_L(R)$  e usando a Equação 2.3, resultam o valor da pressão crítica  $P_c$  e o raio crítico  $R_c$ :

$$\begin{cases} P_c = P_v - \frac{4\gamma}{3R_c}, \\ R_c = R_0 \sqrt{\frac{3P_{g0}}{2\gamma/R_0}} \end{cases} \quad (2.4).$$

Se a pressão no campo de fluxo do líquido cair abaixo da pressão crítica, haverá um crescimento acentuado das bolhas, e a cavitação é iniciada. Portanto, o fluxo se torna cavitativo se a pressão local cair abaixo da pressão crítica  $P_c$ .

A Equação 2.4 nos remete ao fato que as pressões críticas são sempre menores que a pressão de vapor, em um vasto tamanho dos núcleos iniciais. Entretanto,  $P_c$ , é próximo ao valor de  $P_v$ . (KIM, *et al.*, 2013, p. 9).

### 2.1.2 Cavitação Erosiva

A cavitação é acionada na região de baixa pressão com um acentuado crescimento dos núcleos microscópios em bolhas muito maiores. Estas são transportadas pelo líquido para regiões de alta pressão onde elas entram em colapso. Este colapso se torna geralmente violento, porque nos volumes máximos a pressão dentro da bolha é bastante baixa, próximo a pressão de vapor. Considerando pressão de vapor da água na temperatura ambiente, que por sinal é muito baixa, a diferença entre a pressão deste líquido e pressão interna da bolha pode ser bastante grande e propícia a fornecer uma grande aceleração ao micro jato que se forma na direção da parede oposta da bolha (KIM, *et al.*, 2013, p. 10) e (FRANC e JEAN-MARIE, 2004).

O colapso da bolha é acompanhado de compressão do seu conteúdo e subsequente emissão de onda de pressão de alta amplitude, se o colapso da bolha ocorrer próximo o bastante da parede do material, a uma distância menor que em torno de três vezes o seu raio, o micro jato formado atravessa a bolha e choca-se com a parede, e um impulso de pressão acontece.

Na Figura 2.2 mostra-se quando um impulso de pressão é gerado e quando o jato choca-se do outro lado da bolha, terceira imagem da esquerda para a direita. Se o

impulso de pressão resultante exceder algum limite elástico, tal como sua tensão de escoamento ou sua força máxima, um dano local é induzido. O dano do material depende sobre tudo do tempo de exposição ao fluxo cavitativo e da dureza do material exposto.

Para superfícies metálicas, existe geralmente um período de incubação que não apresenta a ocorrência de perda de massa. As deformações permanecem bastante limitadas ao longo do período de incubação e não há intensiva perda de material, as covas formadas são singelas e espaçadas na superfície do material e, transcorrendo o período de incubação, progressivamente estas covas passam a se sobrepor com o aumento do tempo de exposição.

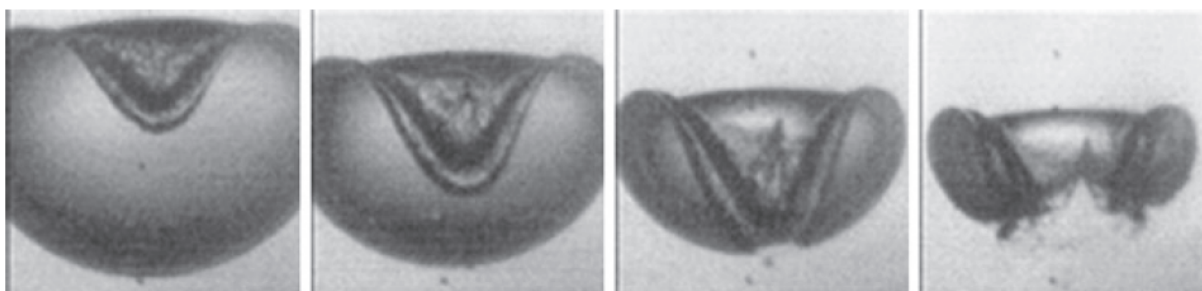


Figura 2.2 – Ilustração do desenvolvimento do jato reentrante durante o colapso de uma bolha próximo a parede rígida plana. Bolhas geradas por centelhas usando uma descarga de condensador de 16 kV em tanque de baixa pressão. Fonte: (Ki,H.K., et al., 2013, p. 11).

O período de perda de massa que segue após o período de incubação aplica-se a maioria dos materiais usados em aplicações hidrodinâmica, mas não pode ser generalizado para todos os materiais, visto que, para materiais frágeis, a falha pode ocorrer sem o período de incubação.

Deve-se ressaltar ainda que a intensidade da cavitação erosiva está ligada a velocidade do fluido, pois com o aumento desta grandeza, há um aumento na quantidade de bolhas formadas que, por seguinte, também provoca o aumento dos pulsos de pressão. Portanto, a grande velocidade resultante provoca queda de pressão, gerando um aumento no gradiente de pressão na área do colapso das bolhas, resultando no aumento dos colapsos e dos pulsos de pressão. Nota-se que é um efeito progressivo que é desencadeado pelo aumento de velocidade do fluido. A interação destes fatos

neste processo produz um efeito fortemente não linear sobre a velocidade do fluido quando a cavitação erosiva se torna severa (KIM, *et al.*, 2013, p. 12).

### **2.1.3 Diagnosticar e monitorar a cavitação.**

Deve-se ter em mente que as cargas impulsivas que originam os danos pelo fenômeno podem ser medidas e ou estimadas usando técnicas diretas e indiretas. Como técnica direta, pode-se citar o monitoramento da intensidade dos picos de pressão através de transdutores de pressão devidamente instalados nas regiões cavitativas. Nesta aquisição de dados em particular, os transdutores usados para este fim devem contemplar características específicas para tornar possível a coleta desta informação.

Devido à natureza de choque de cavitação induzido pelos pulsos de pressão, é necessário usar transdutor com tempo muito pequeno de subida e alta frequência natural, de tal modo que, o sinal do transdutor siga de forma mais exata possível às variações em alta frequência. É também necessário usar sensores de pressão miniaturizados, a fim de ser capaz de separar tanto quanto possível os pulsos de pressão causados pelos diferentes eventos de cavitação.

Entretanto, considerando o tamanho muito pequeno da região significativamente afetada por um singelo evento do colapso, existe geralmente uma grande diferença entre a área sensível do transdutor e a área da região de carga. Assim sendo, a superfície do transdutor está longe de ser uniformemente carregada e o transdutor de pressão não pode dar diretamente uma estimativa precisa do *stress* aplicado localmente. Na prática, a estimação do local onde o transdutor deve ser instalado é de difícil realização. Também se deve levar em consideração que o uso do transdutor de pressão no campo cavitativo traz o risco de danificar o cristal do próprio transdutor (KIM, *et al.*, 2013, p. 73).

Outra técnica direta é usar um material mais maleável, tal como o alumínio (Al 7075), como corpo de prova na região de cavitação, a fim de monitorar a profundidade e a distribuição das covas na região. Nota-se que as técnicas diretas de



monitoramento da cavitação são usadas em laboratório, em ambiente propício aos testes.

Quando se trata do monitoramento em campo, as técnicas indiretas são mais comumente usadas, pois visam monitorar a cavitação sobre o próprio elemento final da planta. Como o próprio nome diz, estas técnicas visam monitorar distorções causadas ao funcionamento normal devido ao fenômeno. Sobre este enfoque, pode-se citar o aparecimento e aumento de vibração e de emissão acústica devido aos picos de pressão causados pelos colapsos das bolhas na região de recuperação de pressão.

Em termos de monitoramento de vibração são usados em geral dois acelerômetros posicionados espacialmente defasados de 90°, no corpo da tubulação imediatamente após a saída da válvula (BO-SUK, *et al.*, 2005). Esta disposição e o uso de dois ao invés de um na configuração para coleta de dados é devido a característica deste dispositivo, pois seu campo de atuação é unidirecional, ou seja, os acelerômetros são pouco sensíveis na direção transversal (WAGNER e BURGEMEISTER, 2012). Desta forma, a aquisição do sinal de vibração é melhor captada quando a vibração é repassada perpendicularmente ao material piezoelétrico.

Em termos de emissão acústica pode-se usar somente um microfone, pois seu campo de atuação é tridirecional. Esta característica foi levada em conta na escolha do transdutor que foi usado neste trabalho.

## **2.2 Estimar o nível de cavitação sobre a válvula de controle através de parâmetro adimensional.**

Devido às fortes mudanças na seção transversal e na direção, o bocal direciona o fluido a um deslocamento que reduz progressivamente a seção transversal do escoamento, este fenômeno é conhecido na literatura como “*vena contracta*”. Como consequência deste fenômeno, aparecem zonas de recirculação entre este escoamento e a parede do bocal que introduzem áreas de depressão devido à aceleração do fluido no escoamento interno ao “*vena contracta*” (DESANTES, *et al.*, 2003). Na Figura 2.3 é apresentado um esboço para a idealização do modelo do fenômeno.

A resultante do perfil de velocidade dependerá do número Reynolds do orifício e a distância de desenvolvimento. Assumindo que a perda por difusão ocorre somente no processo de deslocamento, então o escoamento será ideal entre o ponto (1) e a cavidade no ponto c.

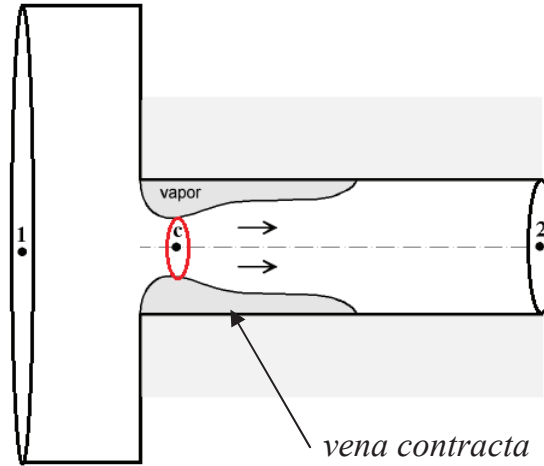


Figura 2.3 - Esboço de modelo de Cavitação em NURICK (1976)

De NURICK (1976), o resultado pela equação de Bernoulli para um escoamento ideal, assumindo  $V_1$  sendo zero é:

$$P_1 = P_c + \frac{1}{2} \rho V_c^2 \quad (2.5),$$

e da continuidade:

$$V_c A_c = \bar{V}_2 A_2 \quad (2.6),$$

o coeficiente de contração é definido como:

$$C_c = \frac{A_c}{A_2} \quad (2.7).$$

Substituindo os resultados para o ponto 1, vem:

$$\frac{P_1 - P_c}{\frac{1}{2} \rho \bar{V}_2^2} = \left( \frac{1}{C_c} \right)^2 \quad (2.8).$$

Se o coeficiente de descarga é definido em termos da perda total ocorrendo na saída (incluindo atrito, Borda-Carnot, e perda de turbulência), então:

$$\bar{V}_2 = C_D \sqrt{2 \frac{(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (2.9),$$

usando esta definição, a Equação 2.8 se torna:

$$\frac{(P_1 - P_c)}{(P_1 - P_2)} = \left(\frac{C_D}{C_C}\right)^2 \quad (2.10),$$

com o aumento do fluxo, eventualmente a pressão em c,  $P_c$ , alcança a pressão de vapor do fluido,  $P_v$ , e irá permanecer constante até a lâmina hidráulica ocorrer. Da Equação 2.10 de cavitação teremos:

$$\left(\frac{(P_1 - P_v)}{(P_1 - P_2)}\right)_{crit} = \left(\frac{C_D}{C_C}\right)^2 \quad (2.11).$$

### 2.3 Prática recomendada

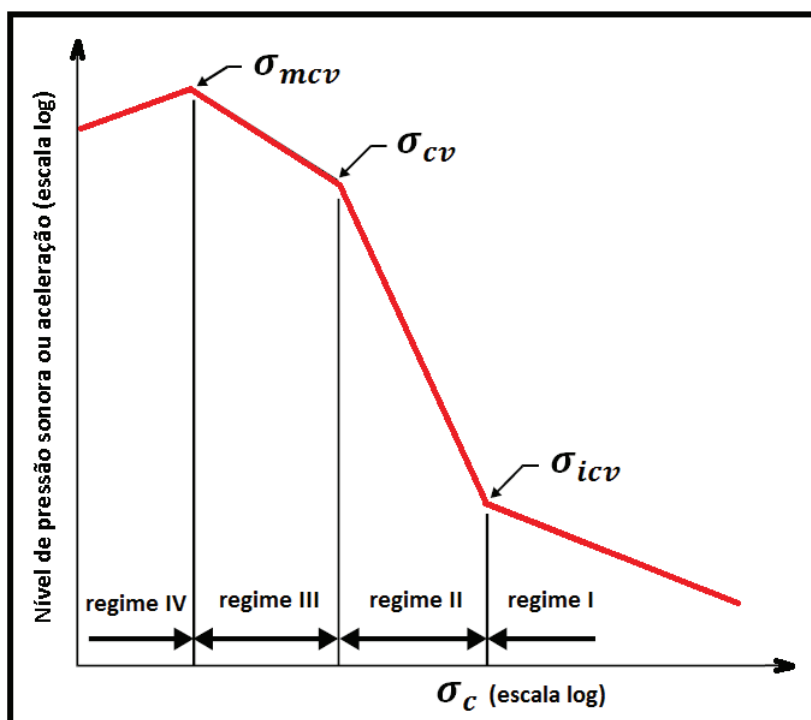
Com a Equação 2.11 é possível estimar se a válvula de controle será submetida ao líquido cavitativo ou não, bastando ter acesso aos sinais de pressão a montante ( $P_1$ ), pressão a jusante ( $P_2$ ), pressão de vaporização ( $P_v$ ), a qual está indexada a temperatura do líquido que também se deve ser mensurado. Este parâmetro adimensional foi adotado como prática recomendada pela *International Society of Automation* (ISA) em RP75.23.01, e nomeado como índice sigma:

$$\sigma_c = \frac{(P_1 - P_v)}{(P_1 - P_2)} \quad (2.12).$$

Em poder deste parâmetro se faz a comparação deste valor com um valor de referência relacionado com a região de cavitação em análise, cuja informação é fornecida pelos fabricantes. É importante frisar que  $\sigma_c$  representa a razão entre as forças do fluido tentando prevenir a cavitação (sistema ou dispositivo de pressão) e as forças tentando causar a cavitação (queda de pressão sobre a válvula). Quanto menor o seu valor mais provável será o aparecimento e intensificação da cavitação severa.

Na Figura 2.4 são apresentados os regimes de cavitação em função o índice  $\sigma_c$ , em cada regime apresenta um perfil de nível de pressão sonora ou aceleração. Nota-se que antes do  $\sigma_{icv}$ , limite do regime I, o nível mesurado é devido a vibração hidrodinâmica do fluido; no regime II, região de cavitação incipiente, a taxa do nível é máxima, ou seja, a baixo do valor indicado como inicio da cavitação incipiente,  $\sigma_{icv}$ ,

os níveis de pressão sonora e aceleração têm aumentos consideráveis para pequenas variações de  $\sigma_c$ ; no regime III é indicado como cavitação constante e no regime IV é descrito como vibração de cavitação máxima.



2.4 - Regiões dos regimes de cavitação e seus limite de acordo com a ISA.

Não se deve confundir o  $\sigma_c$  da cavitação incipiente,  $\sigma_{icv}$ , com o  $\sigma_c$  referente aos danos incipientes, pois este é referente ao tipo de válvula, guarnição e fluido utilizado, valor a baixo deste, a intensificação da cavitação severa ocorrerá.

Na norma ISA - RP75.23.01 é afirmado que a válvula de controle não sofre cavitação se  $\sigma_c > 15$  para válvulas de perda de pressão baixa, ou  $\sigma_c > 8$  para válvulas de perda de pressão alta. Em sistemas onde o fluido do processo é a água, têm-se, também, como recomendações dos fabricantes, para válvulas com guarnição padrão,  $\sigma_c = 2,5$  (limite de cavitação recomendada pelos fabricantes) e  $\sigma_c = 2,3$  (danos incipientes). Estes serão os valores usados neste trabalho para determinar as regiões de detecção da cavitação.

### **3 TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE FALHAS APLICADAS A CAVITAÇÃO.**

Neste trabalho será abordado o uso do sinal de emissão acústica (EA) para o monitoramento e diagnóstico da cavitação. Para tal, buscou-se na literatura dois algoritmos capazes de identificar mudanças nas informações contidas neste sinal. São eles: Cartas de Shewhart e máquina de vetores suporte (SVM).

#### **3.1 Cartas de Shewhart**

O monitoramento estatístico univariado é a forma mais simples de detectar desvios nos sinais. Nesta modalidade o uso das cartas de Shewhart vem trazendo importantes resultados no controle de qualidade.

A carta de Shewhart é uma técnica que visa monitorar a variância de uma grandeza de interesse através dos limites de controle, e todo o processo é assumido que a grandeza monitorada tenha uma distribuição de probabilidade aproximadamente normal (Gaussiana). Caso esta suposição não seja atendida, não serão assegurados que os intervalos de confiança, desta distribuição, sejam idênticos os da distribuição normal.

Deve-se ressaltar que há uma ligação inerente entre os gráficos de controle e os testes de hipóteses. Essencialmente, o gráfico de controle é um teste da hipótese de que o processo está em um estado de controle estatístico. A plotagem de ponto dentro dos limites de controle é equivalente a não rejeitar a hipótese de controle estatístico, e um ponto de plotagem fora dos limites de controle é equivalente a rejeitar a hipótese de controle estatístico (MONTGOMERY e RUNGER, 2002). O teste pode ser representado de forma gráfica, como mostrado na Figura 3.1.

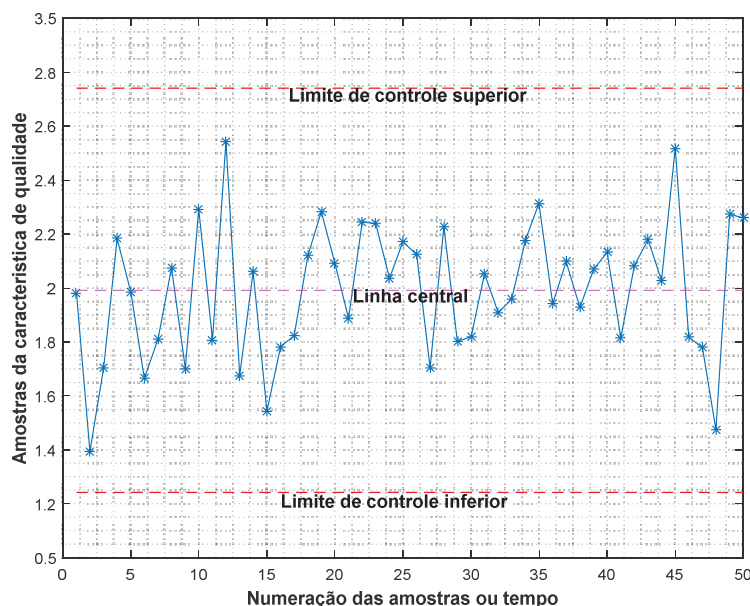


Figura 3.1 – Representação gráfica da carta de Shewhart.

A linha central é a média, e os limites superiores e inferiores são os intervalos calculados em relação à linha central, sendo eles calculados em múltiplos do desvio padrão. Deve-se ressaltar que a média e o desvio padrão usados são calculados sobre dados de treinamento, ou seja, dados que contenham informações sobre o estado de normalidade do processo (MONTGOMERY e RUNGER, 2002).

### 3.2 Máquina de vetores suporte (SVM)

SVM é uma técnica de reconhecimento de padrões baseada na metodologia de aprendizagem por exemplos. De forma sucinta, tem-se uma máquina cuja tarefa é aprender a mapear  $x \mapsto f(x, \alpha)$ , onde uma função núcleo  $f(x, \alpha)$  é usada para classificar um dado  $x$  de acordo com o ajuste do parâmetro  $\alpha$  (BURGES, 1998). Na fase de treinamento é selecionada qual a função  $f(x, \alpha)$  que efetivamente será usada como classificadora. Através de uma matriz  $X$  que contenha os dados de entrada e um vetor  $y$ , que contém as classes verdadeiras de cada vetor da matriz  $X$  de entrada, são calculados os parâmetros da função selecionada.

Em função do espaço característico, construído através do conjunto de vetores em  $\mathbb{R}^n$ , da divisão de classes e da escolha de  $f(x, \alpha)$ , o algoritmo de treinamento irá produzir uma superfície de separação (hiperplano) que irá mapear cada vetor da matriz  $X$  em cada classe, de forma a minimizar o erro de classificação. No caso em que os vetores de entrada tenham duas dimensões e  $f(x, \alpha)$  seja uma função linear, tem-se uma reta como hiperplano separador, sendo este espaço característico exemplificado na Figura 3.2 .

### 3.2.1 Formulação matemática

Suponha que é fornecido um conjunto de dados de entrada, e cada dado é constituído de um vetor  $x_i$ . Supondo que cada vetor deva ser classificado entre duas classes  $\pm 1$  que é constituído no vetor  $y$ . Desta forma teremos

$$(x_1; y_1), \dots, (x_m; y_m) \in \mathcal{X} \times \{\pm 1\} \quad (3.1),$$

onde,  $\mathcal{X}$  é algum conjunto não vazio em que o padrão  $x_i$  é associado a  $y_i$ , o qual descreve a classificação de  $x_i$ .

Na fase de aprendizado, deseja-se treinar o algoritmo como sendo capaz de identificar os novos vetores de entrada, e predizer se  $y \in \{\pm 1\}$ . Ou seja, é feita a escolha de  $y$  baseada no conteúdo do vetor  $x$  tal que é obtido  $(x, y)$ . Quanto mais correta for a associação de  $x$  a  $y$ , isto é a identificação da classe correta para cada vetor, melhor o desempenho do algoritmo.

Na classificação binária, como usada neste trabalho, só existe dois tipos de classes, que podem ser expressos como  $\pm 1$ .

#### 3.2.1.1 Hiperplano classificador linearmente separável

A meta do SVM é encontrar um hiperplano que separa duas classes no espaço. Considere a classe do hiperplano em algum produto interno  $\mathcal{H}$ . Com isso, a separação é feita através do hiperplano definido pela Equação 3.2:

$$\langle w, x \rangle + b = 0 \text{ onde, } w \in \mathcal{H}, b \in \mathbb{R} \quad (3.2),$$

onde  $w$  corresponde o vetor de pesos e  $b$  é o termo de tendência ou polarização, Assim a função de decisão é obtida, através da Equação 3.3:

$$f(x) = \text{sgn}(\langle w, x \rangle + b) \quad (3.3),$$

onde  $x$  é associado a uma classe quando o valor de  $f(x)$  é positivo, e associado a outra classe caso contrário.

A fim de encontrar um hiperplano ótimo, no sentido de maximizar a separação entre as classes, deve-se resolver a seguinte função objetivo, juntamente com a restrição:

$$\begin{aligned} &\text{mimimizar} \\ &w \in \mathcal{H}, b \in \mathbb{R} \quad \tau(w) = \frac{1}{2} \|w\|^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\text{sujeito a } y_i(\langle w, x_i \rangle + b) \geq 1 \text{ para todo } i = 1, \dots, m. \quad (3.5).$$

A função  $\tau(w)$  na equação 3.4 é chamada de função objetivo, enquanto a inequação em 3.5 é chamada de restrições de desigualdade. Juntas compõem um problema de otimização restrita. Este tipo de problema é tratado através do multiplicador de Lagrange  $\alpha_i \geq 0$  e um Lagrangeano,

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^m \alpha_i (y_i(\langle x_i, w \rangle + b) - 1). \quad (3.6).$$

O lagrangeano  $L$  tem que ser minimizado com relação às variáveis primárias  $w, b$  e maximizado com relação as variáveis duais, ou seja, o ponto de sela deve ser achado.

A Equação 3.6 pode ser entendida da seguinte forma: se a restrição é violada, ou seja,  $y_i(\langle w, x_i \rangle + b) - 1 < 0$ ,  $L$  pode ser aumentado pelo aumento do correspondente  $\alpha_i$ , ao mesmo tempo,  $w$  e  $b$  terão que mudar, de tal modo que  $L$  diminuirá. Para prevenir que  $\alpha_i(y_i(\langle x_i, w \rangle + b) - 1)$  se torne um número negativo arbitrariamente grande, a mudança em,  $w$  e  $b$  irá garantir que, desde de que o problema seja separável, a restrição será eventualmente satisfeita. Similarmente, pode-se entender que para toda restrição que não são precisamente conhecidas como igualdade, isto é, para  $y_i(\langle x_i, w \rangle + b) - 1 > 0$ , o correspondente  $\alpha_i$  tem que ser zero: este é o valor de  $\alpha_i$  para maximizar  $L$ . Esta afirmação é dada por Karush-Kuhn-Tucher (KKT) (SCHÖLKOPF e SMOLA, 2002).



Para achar o ponto de sela,  $L$  é derivado com as respectivas variáveis primárias que devem desaparecer:

$$\frac{\partial L(w,b,\alpha)}{\partial b} = 0 \text{ e } \frac{\partial L(w,b,\alpha)}{\partial w} = 0 \quad (3.7),$$

conduzindo para

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i = 0 \quad (3.8)$$

e

$$w = \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i x_i \quad (3.9).$$

Como vetor solução tem-se uma expansão em 3.9 em termos dos subconjuntos de treinamento, sendo que os  $\alpha_i$  não nulos são chamados de vetores suporte. Pela condição de KKT:

$$\alpha_i (y_i (\langle x_i, w \rangle + b) - 1) = 0 \text{ para } i = 1, \dots, m. \quad (3.10)$$

Os vetores suportes estão alinhados com a margem, linha pontilhada amostrada na Figura 3.2. Todas as amostras restantes de treinamento são irrelevantes e podem ser deixadas de fora, de forma a não aparecerem na expressão 3.9.

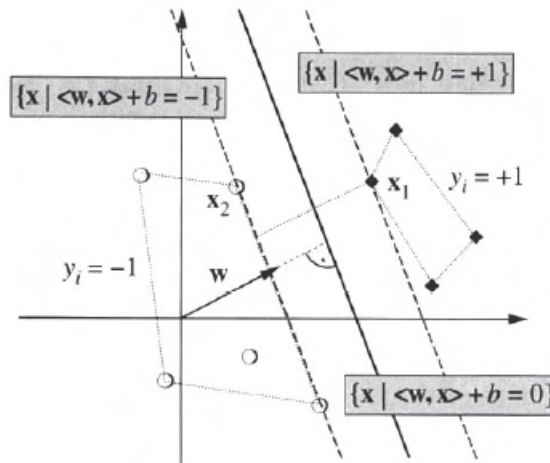


Figura 3.2 – Separação linear do classificador binário entre pontos circulares e losangos. Fonte: (SCHÖLKOPF e SMOLA, 2002, p. 12)

Substituindo 3.9 e 3.10 no próprio Lagrangeano,  $L$  de 3.6, são eliminados  $w$  e  $b$ , tornando um problema que se pode resolver na prática:

$$\underset{\alpha \in \mathbb{R}^m}{\text{maximizar}} W(\alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle x_i x_j \rangle \quad (3.11)$$

sujeito a

$$\alpha_i \geq 0 \text{ para } i = 1, \dots, m \text{ e } \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i = 0. \quad (3.12).$$

Usando 3.8, a função decisão do hiperplano, Equação 3.3, pode ser reescrita como

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^m y_i \alpha_i \langle x_i x_j \rangle + b\right), \quad (3.13),$$

onde b é calculado através da Equação 3.10.

### 3.2.1.2 Hiperplano classificador para o SVM não linear

Na Equação 3.15 é expresso o produto interno dos vetores  $x, x'$  em termos da função *kernel* k avaliado nas características de entrada  $x, x'$ ,

$$k(x, x') = \langle x, x' \rangle = \langle \Phi(x), \Phi(x') \rangle. \quad (3.14).$$

Esta substituição é usada por BOSER, GUYON e VAPNIK (1992) para estender o hiperplano classificador de forma generalizada ao SVM não linear. Esta formulação matemática realiza o produto interno no espaço de entrada e não mais no espaço característico. Desta forma, é feito um mapeamento através da função *kernel* k, de forma que o espaço característico seja separável:

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^m y_i \alpha_i \langle \Phi(x), \Phi(x') \rangle + b\right)$$

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^m y_i \alpha_i k(x_i, x_j) + b\right) \quad (3.15).$$

Assim a seguinte programação quadrática se torna em:

$$\underset{\alpha \in \mathbb{R}^m}{\text{maximizar}} W(\alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m \alpha_i \alpha_j y_i y_j k(x_i, x_j) \quad (3.16)$$

sujeito a

$$\alpha_i \geq 0 \text{ para todo } i = 1, \dots, m \text{ e } \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i = 0. \quad (3.17)$$

### 3.2.1.3 Hiperplano com margem flexível

Na prática, o hiperplano separador pode não existir em muitos casos. Por exemplo, se há grande sobreposição entre as classes, aparecerá violação da restrição descrita na Equação 3.5, ou seja, terá vetores que se posicionarão internamente a regiões das margens separadoras, ou seja, entre as curvas que contém os vetores suporte. Para remediar esta situação é introduzida uma variável de folga,  $\xi$  sendo,  $\xi_i \geq 0$  para  $i = 1, \dots, m$ . Desta forma, a restrição na Equação 3.5 se torna mais flexível,

$$y_i(\langle w, x_i \rangle + b) \geq 1 - \xi_i \text{ para } i = 1, \dots, m. \quad (3.18).$$

A realização de tal classificador com margem flexível é obtido através da minimização da função objetivo

$$\tau(w, \xi) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m \xi_i \quad (3.19)$$

sujeita a restrição em 3.18, onde a constante  $C > 0$ , na função objetivo em 3.19, determina o balanço entre a maximização das margens e a minimização do erro de treinamento.

Introduzindo este novo ajuste a função *kernel*, e reescrevendo em termos do multiplicador de Lagrange, leva a maximizar 3.16 sujeito as restrições

$$0 \leq \alpha_i \leq C \text{ para } i = 1, \dots, m \text{ e } \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i = 0. \quad (3.20).$$

A solução tem a forma da Equação 3.15 e o limiar  $b$  pode ser calculado explorando o fato que todos os vetores suportes  $x_i$  com  $\alpha_i < C$ , a variável de folga é zero, segundo as condições de KKT, e, portanto,

$$\sum_{j=1}^m \alpha_j y_j k(x_i, x_j) + b = y_i. \quad (3.21)$$

### 3.2.1.4 Função *kernel*

Para que uma função seja usada como *kernel* ela deve atender o teorema de Mercer descrito em VAPNIK, V. N. (1999) como:

Para garantir que a função simétrica  $k(u, v)$  de  $L_2$  tenha uma expansão

$$k(u, v) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \Phi_i(u) \Phi_i(v), \quad (3.22)$$

com coeficientes  $a_i > 0$ , é necessário e suficiente que

$$\int k(u, v) g(u) g(v) du dv > 0 \quad (3.23)$$

ser válida para toda  $g \neq 0$  para qual

$$\int g^2(u) du < \infty, \quad (3.24)$$

Se a função *kernel* atender esta condição, garante-se a existência de um espaço característico onde a função gera um produto interno (VAPNIK, 2000). Na Tabela 3.1 são apresentadas algumas funções que atendem o teorema de Mercer.

Tabela 3.1 - Funções núcleos mais comumente utilizadas.

Enumeração	Função núcleo	$k(x, y)$
1	Linear	$\langle x, y \rangle$
2	Polinomial	$(\langle x, y \rangle + c)^d$
3	Gaussiana ou (RBF- Radial Basis Function)	$\exp\left\{-\frac{\ x-y\ ^2}{2\sigma_k^2}\right\}$
4	$\chi^2$	$\frac{(x-y)^2}{x+y}$

### 3.2.1.5 Treinamento do SVM

A fase de treinamento do SVM requer a resolução de programação quadrática descrita como:

$$\underset{\alpha \in \mathbb{R}^m}{\text{maximizar}} W(\alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m y_i y_j k(x_i, x_j) \alpha_i \alpha_j \quad (3.25)$$

Sujeito a

$$0 \leq \alpha_i \leq C \text{ e } \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i = 0. \text{ para todo } i = 1, \dots, m$$

Para resolver as Equações em 3.25 existe uma grande quantidade de códigos e publicações disponíveis, mas podem-se citar com maior relevância quatro classes de algoritmo: códigos de pontos interiores, seleção de subconjunto, minimização sequencial, e métodos iterativos (SCHÖLKOPF e SMOLA, 2002).

Neste trabalho usou-se a Otimização Mínimo Sequencial (SMO) devido sua característica de rápida convergência para solução. Em SCHÖLKOPF e SMOLA (2002, seção 10) descreve os demais tipos de algoritmos mencionados.

Descrevendo de forma sucinta, o SMO fragmenta o problema de programação quadrática em uma série de problemas possíveis e menores, e estes são resolvidos analiticamente. Ou seja, se escolhe resolver o menor problema possível de otimização com muitos passos. A resolução do problema de programação quadrática via SMO pode ser consultado em SCHÖLKOPF, BURGESS e SMOLA (1999) de forma mais detalhada.

Neste trabalho toda a realização prática das técnicas constituintes do SVM foi feita por meio do ambiente de programação Matlab, através de duas funções disponível em seu *toolbox*, a *svmtrain* e a *svmclassify* que representam a fase de treinamento e a classificação respectivamente.

Na primeira função, etapa de treinamento, os dados de entrada são formados pelos conjuntos de vetores,  $x$ , tendo as características dos padrões do processo,  $y$ , classificação destas características fornecidas através do conhecimento prévio do processo pelo especialista, o tipo de função *kernel* que se quer utilizar e dependendo desta função *kernel*, deve-se fornecer um ou mais parâmetros de entrada. Por exemplo, para função gaussiana, deve-se informar o desvio padrão  $\sigma_k$ . Se o método de otimização quadrática for omitido, na entrada desta função, o padrão usado é SMO.

Na segunda função, etapa de teste, é feita a classificação de novos dados, com base na estrutura calculada pela primeira função.

## 4 APLICAÇÃO

A partir desta parte do trabalho as pesquisas realizadas somente foram possíveis através adaptações necessárias que foram efetuadas na planta piloto, tais como: modificação no circuito de tubulações, instalação de uma nova bomba compatível com o perfil de pressão necessária a produção de cavitação, e instalação de transdutores pressão. Estas modificações são melhores apresentadas na descrição da planta piloto.

Transpondo esta fase, as análises sobre os dados coletados foram efetuadas e as técnicas descritas no capítulo 3 foram aplicadas e comparadas através de algumas métricas. Portanto o desenvolvimento dos resultados alcançados é apresentado a partir deste Capítulo.

### 4.1 Planta piloto

A coleta dos dados para estudo da detecção do fenômeno de cavitação foi feita em uma planta piloto, apresentada na Figura 4.1, instalada no laboratório de pesquisa de processos da UFES. Esta planta é composta de dois reservatórios interligados por tubulações de 1 ½” e 1” de aço carbono e inox, respectivamente, e no reservatório superior tem instalado uma resistência onde é feito o aquecimento da água.

No circuito entre os tanques, há duas válvulas tipo globo rotacional, fabricante Masoneilan, modelo 35-35212, diâmetro interno de 1 ½”, ANSI 150, com  $C_v$  de projeto 8,4, contendo um obturador excêntrico, uma instalada na tubulação de descarga da bomba múltiplo estágio tipo *booster*, fabricante Schneider, modelo BT4, com motor WEG trifásico, ¾ CV, 3460 RPM, e a outra instalada na tubulação de retorno do tanque superior para o inferior, esta não sendo usada nos testes deste trabalho.

Esta bomba foi instalada para proporcionar o perfil de pressão necessário a cavitação, ela foi alimentada através do inversor de frequência da marca Emerson, modelo: SKA1200037 Potência: 0,37kW, a fim de controlar a vazão do fluido que passa pela válvula também através da variação de frequência entregue a bomba.

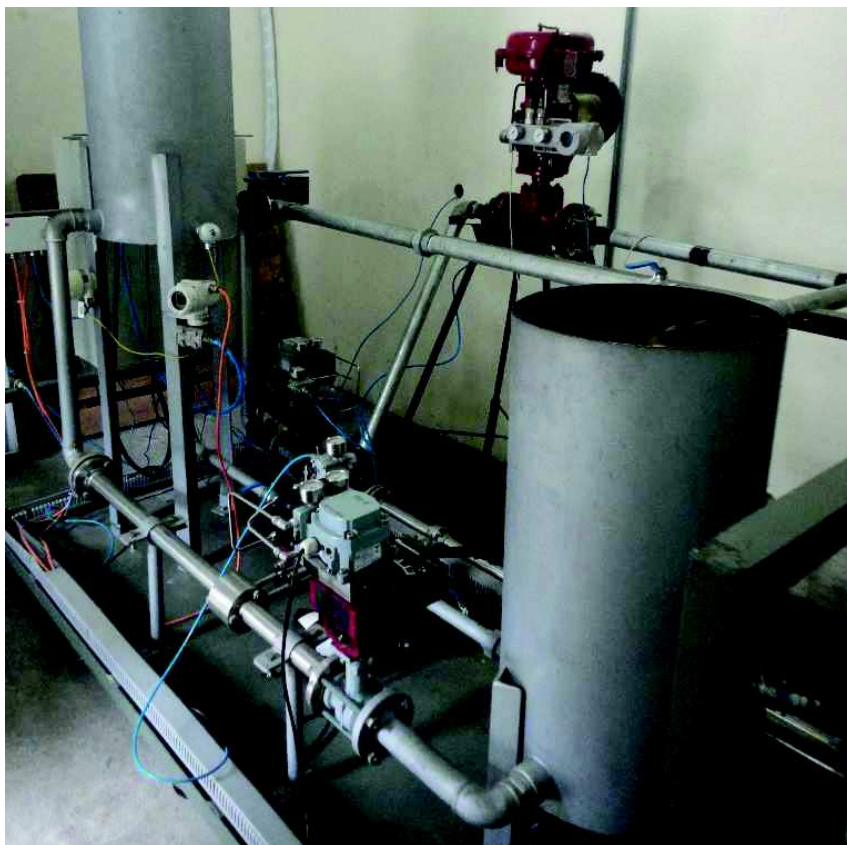


Figura 4.1- Foto da planta piloto usada nos ensaios.

Há ainda dois transdutores de pressão diferencial, o primeiro do fabricante ABB modelo 2010 TD instalado no tanque superior, usado para controle de nível e o segundo do fabricante Rosemount modelo 3051C, instalado entre a bomba e a válvula, usado para medição de vazão, através da medição diferencial de pressão em uma placa de orifício.

O circuito de tubulações original, entre a saída da bomba e o tanque superior, foi modificado para tornar possível a recirculação do fluido entre a válvula de saída da bomba, usadas nos ensaios, e o tanque inferior. O fluido usado no processo foi água.

Para aquisição dos dados foram instalados dois transdutores de pressão, um a montante e um a jusante da válvula de saída da bomba, e um microfone de eletreto ao qual foi fixado imediatamente após a saída deste elemento final, no corpo da tubulação, Figura 4.2.



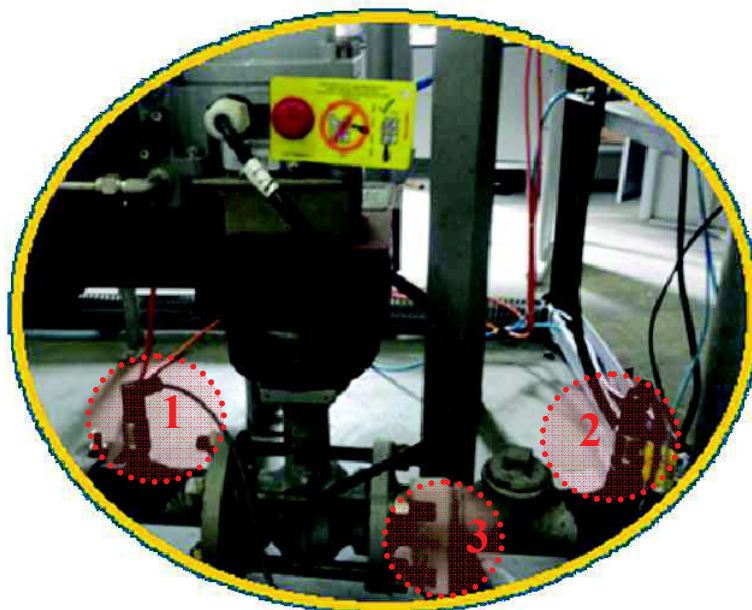


Figura 4.2- Detalhe da instalação dos transdutores de pressão; em um a montante e em dois a jusante da válvula, e o microfone de eletreto em três.

Para cada teste, foram coletados os sinais de 4-20 mA dos transdutores de pressão que foram convertidos em sinais de tensão. O microfone foi polarizado, e seu sinal foi amplificado em 34 dB antes de ser transmitido ao processo de coleta de dados. Os sinais foram adquiridos com o sistema de aquisição de dados da empresa Dspace, com frequências de amostragens de 25 e 20 kHz.

As escolhas das frequências de amostragens em que os dados foram coletados foram feitas através da análise da densidade espectral de potência (PSD) de todos os sinais coletados, via *Fast Fourier Transform* (FFT).

## 4.2 Índices de desempenho usados para comparar métodos

Foram utilizadas quatro métricas para quantificar e comparar métodos de detecção, sendo elas: precisão (P), sensibilidade (S), medida F1 (F1) e acurácia (A) (FACELI, *et al.*, 2011):

$$P = VP/(VP + FP), \quad (4.1)$$

$$S = VP/(VP + FN), \quad (4.2)$$

$$F1 = 2PS/(P + S), \quad (4.3)$$



$$A = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN} \quad (4.4)$$

onde as definições dos parâmetros são apresentados na Tabela 4.1.

Note que a precisão penaliza a detecção correta do fenômeno em detrimento a uma detecção falsa. A sensibilidade penaliza a detecção correta da cavitação em detrimento a não detecção da ocorrência de cavitação. Portanto, P baixo implica que houve alta taxa de ocorrência de FP, ao passo que S baixo implica que houve alta taxa de ocorrência de FN.

Tabela 4.1 - Parâmetros considerados para as métricas

Nomenclatura	Descrição	Definição
VP	Verdadeiro Positivo	Ocorreu a cavitação e foi detectada.
VN	Verdadeiro Negativo	Não ocorreu a cavitação e não foi detectada.
FP	Falso Positivo	Não ocorreu a cavitação, mas foi detectada.
FN	Falso Negativo	Ocorreu a cavitação, mas não foi detectada.

A medida F1 é uma média harmônica entre precisão e sensibilidade, e a acurácia penaliza todos os diagnósticos corretos em detrimento a todos os tipos de erros.

### 4.3 Ensaios em malha aberta com dados coletados a 25 kHz.

Antes de iniciar os ensaios, ajustou-se a temperatura da água para 38°C, e com uma bomba de múltiplos estágios tipo Booster, se fez recircular a água através da válvula. O controlador Freelancer 2000 Select da ABB, instalado na planta, foi usado para enviar sinais de 4 a 20 mA, para que a válvula operasse em 70%, 50%, 30%, 20% e 10% de abertura. Para cada abertura, foram coletadas 2.521.700 amostras.

Para validação dos resultados foram coletados novos dados, fixando a frequência da bomba em 60 Hz, e, variando a abertura da válvula em 40, 35, 30, 27, 24, 21, 18 e 13%. Para cada abertura, foram coletadas 3.025.200 amostras. Após isso, a abertura da válvula foi fixada em 10% e variada a frequência entregue a bomba pelo

inversor em 37, 49, 52, 57, 64, 70, 75 e 85% dos 60 Hz. Para cada porcentagem de frequência, foram coletadas 3.026.500 amostras.

### 4.3.1 Análise dos dados coletados

Na Figura 4.3 são mostrados  $P_1$ , o desvio padrão,  $\sigma$ , do sinal de emissão acústica medido e o  $\sigma_c$  calculado usando a Equação 3.8, considerando  $P_2 = 1,09$  bar e  $P_v(38^\circ\text{C}) = 0,0662$  bar e para identificar o fluxo com escoamento cavitativo se referenciou ao  $\sigma_c = 2,3$ , tal como foi apresentado no Capítulo 2.

Os valores de  $\sigma$  apresentados na Figura 4.3 foram calculados tomando 10000 amostras em cada ponto de operação, mesma quantidade que foi usada para calcular as médias das pressões a montante e a jusante, as quais foram usadas para calcular o  $\sigma_c$ .

Nota-se que o fluxo cavitativo com a eminência de danos incipientes se inicia um pouco abaixo do ponto de operação da válvula (Figura 4.3, no gráfico superior), em 30% de abertura, que coincide com o aumento do desvio padrão amostral,  $\sigma$ .

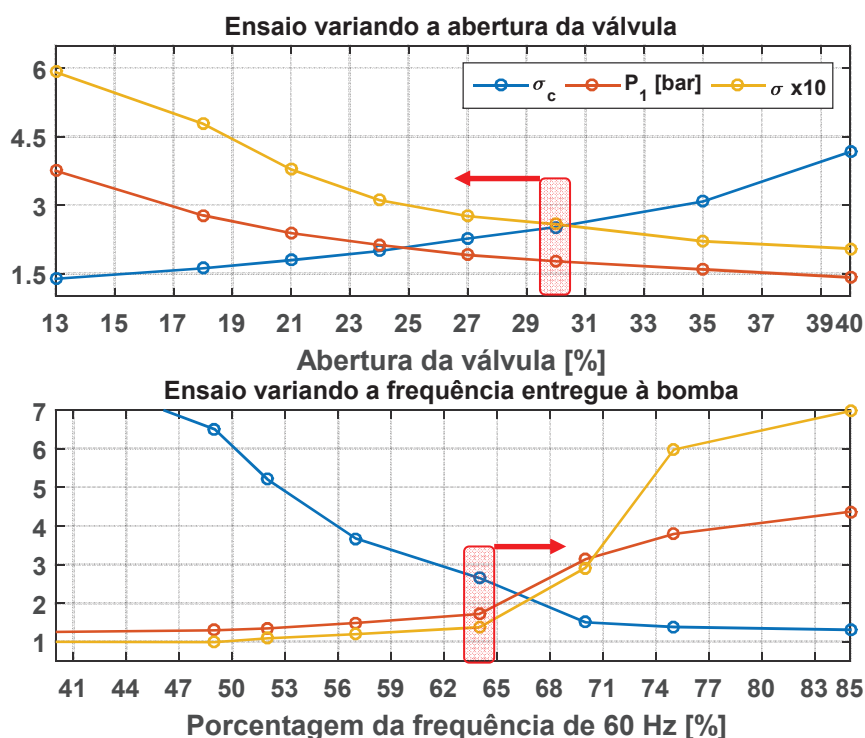


Figura 4.3- Resultado dos dois ensaios, variando a abertura da válvula e variando a frequência entregue a bomba.

Nota-se ainda na Figura 4.3, no gráfico inferior que, variando a frequência fornecida à bomba, a pressão à montante aumenta gradativamente até 64% da frequência da rede. Quando a frequência é ajustada para 70% há um salto em  $P_1$  causando uma redução abrupta de  $\sigma_c$  de 2,65 para 1,51. Percebe-se nesta região que pequenas variações nas frequências entregues à bomba produzem grandes alterações em  $\sigma_c$ , quando comparadas a outros pontos de operação, e que nesta região se situa a transição de normalidade para a região de cavitação.

Quando a cavitação começa a ocorrer, a vazão do fluxo pela válvula vai sendo restringida e o fluxo à jusante entra em rotação, o que promove uma região de baixa pressão, propiciando a vaporização do fluido. Portanto, há perturbação na variação de pressão à montante em função da restrição de vazão ocorrida por este mecanismo, explicando este salto de pressão nesta região.

#### **4.3.2 Potencial da sensibilidade dos momentos estatísticos ao fenômeno de cavitação.**

Muitas características inseridas nos dados podem ser mensuradas através dos momentos estatísticos, sendo assim, os métodos usados de estimação com estes parâmetros são correlacionados com a distribuição normal, que é caracterizada sobre os sinais aleatórios.

Como a função densidade de probabilidade (fdp) pode ser decomposta em seus momentos, e se uma mudança na condição de operação causa uma mudança na fdp da variável, os sinais dos momentos estatísticos que tiveram mudanças consistentes, podem proporcionar informações importantes ao diagnóstico (BO-SUK, *et al.*, 2005).

Como os métodos propostos para detecção de cavitação se baseiam nos momentos estatísticos dos dados, o primeiro passo é avaliar o comportamento de cada um, ou seja, deve-se avaliar a média ( $\mu$ ):

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (4.5)$$

o desvio padrão ( $\sigma$ ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}, \quad (4.6)$$

a curtose ( $\kappa$ ):

$$\kappa = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{\sigma^2} \quad (4.7)$$

e o fator forma ( $s$ ):

$$s = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (4.8)$$

onde  $N$  é o número total de amostras e  $x_i$  é a  $i$ -ésima mostra da janela selecionada, para pontos de operação com e sem cavitação a fim de detectar mudanças consistentes nestes momentos, de forma a proporcionar a informação necessária ao diagnóstico.

Das amostras coletadas nos ensaios, foram usadas 700.000 amostras de cada sinal em cada ponto de operação, com frequência de amostragem de 25 kHz. Destes, 20 janelas com 7000 dados cada, foram selecionadas para o cálculo dos momentos, ou seja, o tamanho de cada janela é 1% do tamanho da população considerada, e as janelas não eram sobrepostas.

Os momentos estatísticos para o sinal de pressão à jusante são mostrados nas Figura 4.4, nota-se que nenhum deles apresentou mudanças entre a região de normalidade e a região com escoamento cavitativo. Portanto este sinal coletado não traz informação propícia ao diagnóstico.

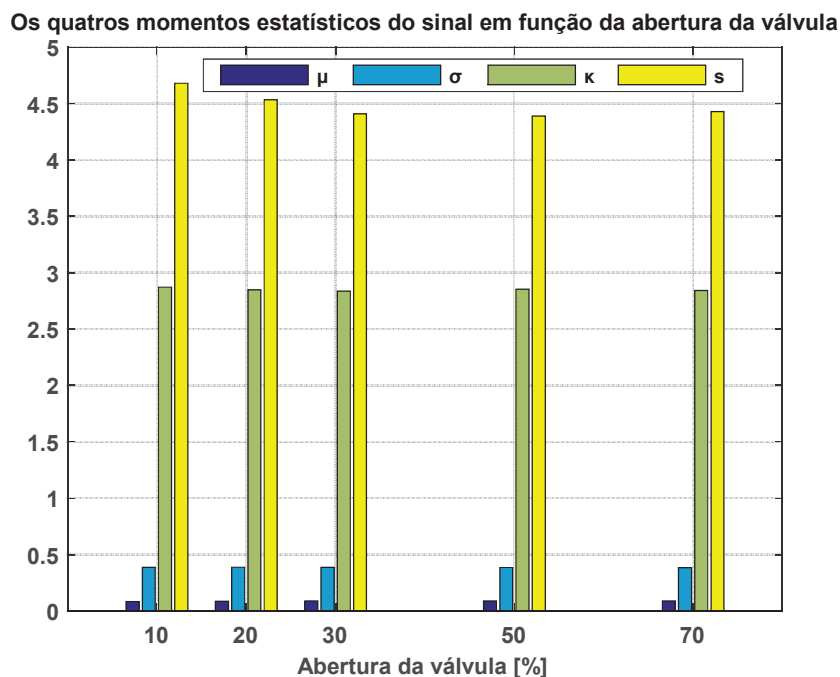


Figura 4.4 - Variação dos momentos estatísticos do sinal de pressão a jusante nas regiões de cavitação (abertura da válvula < 30%) e não cavitação (abertura da válvula  $\geq$  30%).

Na Figura 4.5 é apresentado os momentos estatísticos do sinal de emissão acústica. Analisando o gráfico observa-se que o desvio padrão e fator forma são mais sensíveis às situações com (abertura < 30%) e sem (abertura  $\geq$  30%) cavitação. Portanto, estes momentos deste sinal serão utilizados como parâmetros de monitoramento.

Observa-se ainda neste mesmo gráfico que a média é pouco afetada, para este sinal, a curtose apresenta variação apenas no início da cavitação, depois não é sustentada com a intensificação do fenômeno. Neste mesmo gráfico deve-se notar que a curtose apresenta valores próximos de 3, exceto para abertura da válvula em 20%, isto indicando que a curva da distribuição dos dados está próxima da curva da distribuição normal.

Deve-se ressaltar que o fator forma é uma relação do desvio padrão pela média e que a média não apresentou nenhuma sensibilidade. Desta forma, também é pertinente instituir uma análise do potencial do desvio padrão somente como parâmetro de monitoramento.

Os quatros momentos estatísticos do sinal em função da abertura da válvula

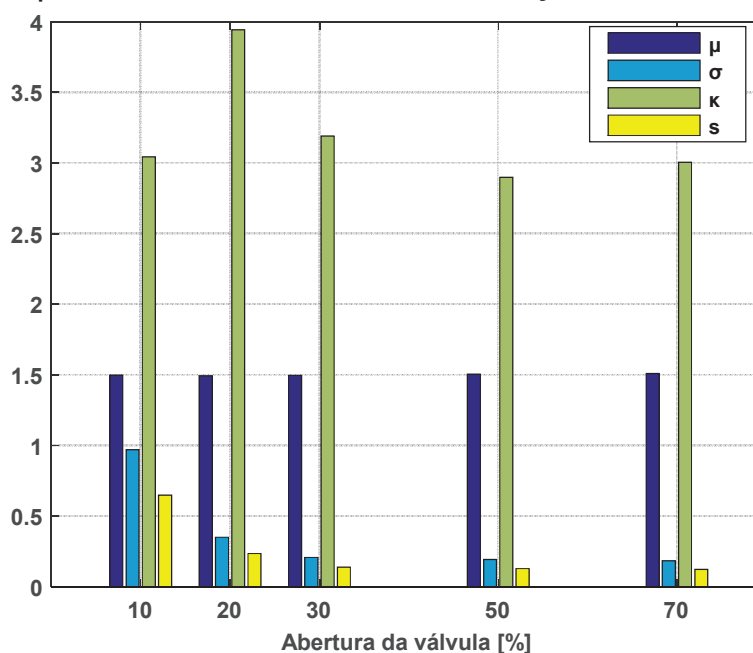


Figura 4.5 - Variação dos momentos estatísticos do sinal de emissão acústica nas regiões de cavitação (abertura da válvula < 30%) e não cavitação (abertura da válvula  $\geq$  30%).

### 4.3.3 Análise espectral sobre o sinal de emissão acústica

Como apresentado no Item 4.3.2, os dados do sinal de emissão acústica, através do desvio padrão, contém informação sobre qual região de operação da válvula está sendo submetida ao fluxo cavitativo, resta saber qual a banda de frequência que trás esta informação neste sinal.

Portanto na Figura 4.6 estão apresentados os cálculos da densidade espectral de potência para cada ponto de operação da válvula considerado. Nesta Figura nota-se que quando a válvula não está na região de cavitação (70, 50, 30% de abertura da válvula), a predominância da energia do sinal está nas frequências abaixo de 2 kHz, que representam a emissão acústica da vibração hidrodinâmica e outras fontes provindas da própria operação da planta, percebe-se que estas energias se mantêm quando a válvula entra na região de fluxo cavitativo (10 e 20% de abertura da válvula).

Nesta região, entre 2 kHz a 12 kHz, se intensifica um espalhamento de potência considerável, antes não existente na região com fluxo não cavitativo, percebe-se que dentro nesta banda de frequência a predominância de potência está entre 5 a 10

kHz. Portanto a informação de cavitação contida no desvio padrão pode ser capturada com um sinal amostrado em 10 kHz, sendo necessário a remoção do ruído produzido por outras fontes, pode-se utilizar um filtro passa alta em 4 kHz, monitorando a banda que necessariamente contém a informação sobre o fenômeno.

Mesmo com esta informação, optou-se em não filtrar o sinal de emissão acústica, para fins de detecção automática do fenômeno, uma vez que os cálculos dos momentos estatísticos trazem tão somente informação de variações na densidade de probabilidade do sinal, sendo assim, pode ser percebido que as informações contidas nas frequências abaixo de 2 kHz não contribuem para estas variações.

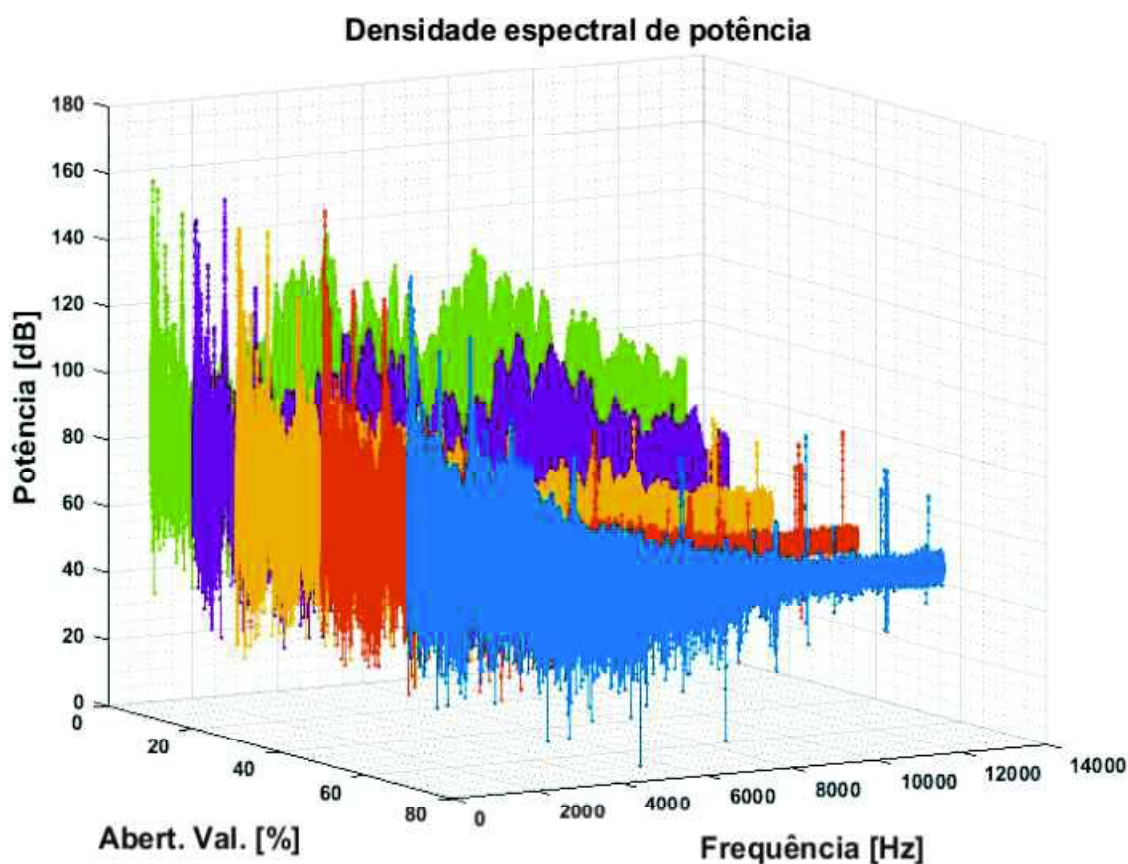


Figura 4.6 – Densidade espectral de potência do sinal de emissão acústica para os pontos de operação de 10, 20, 30, 50 e 70% de abertura da válvula.

#### 4.3.4 Análise prévia usando cartas de Shewhart e SVM

Para aplicar as cartas de Shewhart e a técnica SVM, foram extraídas as informações do sinal acústico, levando em consideração a análise já desenvolvida no Item 4.3.3. Para cada um dos cinco pontos de operação da válvula mencionados no início da Item 4.3.1, foram selecionadas 20 janelas com 7000 amostras cada, totalizando 700.000 amostras. Esses dados foram usados para modelar as cartas de Shewhart e as funções do SVM. As amostras com abertura da válvula de 10% a 20% foram rotuladas com cavitação, enquanto que as de abertura de 30% a 70% sem cavitação.

Para a carta de Shewhart é necessário somente o sinal propriamente dito de cada janela e calcular os limites de controle estatístico. Para usar a carta de Shewhart tipo S é necessário obter o desvio padrão de cada segmento dos sinais. Para isso, cada uma das janelas de 7000 amostras foi dividida em 70 partes com 100 amostras cada e de cada parte foi calculado o desvio padrão. Foi efetuado o teste de hipótese de Kolmogorov-Smirnov (FELDMAN e FLORES, 2010, p. 95-98) para avaliar se os valores calculados tinham uma distribuição normal, pois para o uso das cartas de controle este é o critério que deve ser atendido.

Por fim, para o SVM, para cada janela foram calculados os valores de desvio padrão e fator forma, por serem estes os momentos estatísticos mais sensíveis à cavitação, como indicado no Item 4.3.3.

Para validação foi coletada a mesma quantidade de amostras usadas para modelagem, igualmente distribuídas para as aberturas de 35, 30, 27, 24 e 21%, as quais foram divididas em 20 janelas de 7000 amostras para cada abertura e realizados os mesmos procedimentos anteriores para a extração dos momentos. Foi considerada cavitação para aberturas abaixo de 30%. Na Figura 4.3, no gráfico superior, são apresentados os valores dos  $\sigma_c$  calculados para os respectivos pontos de operação.

Também se fez o ensaio com a abertura da válvula fixa em 10% e variou-se a frequência entregue à bomba. Este experimento visou verificar se a cavitação era igualmente identificada variando a frequência da bomba ao invés da abertura da



válvula. Neste ensaio foram considerados os dados coletados em 57, 64, 70, 75 e 85% de 60 Hz para nova validação. A quantidade de amostras e os procedimentos de janelamento foram os mesmos do primeiro ensaio.

Foram avaliados intervalos de confiança (ou limites de controle) de 1 a 4 desvios padrão para a carta de Shewhart. Na Figura 4.7 é apresentado o resultado gráfico para uma das cartas de Shewhart sobre o sinal. As primeiras 7000 amostras são os dados de treinamento (sem cavitação) e acima de 7000 são os dados de teste, com a válvula operando em 24% de abertura, e considerando um limiar de 4 desvios padrão calculado e ajustado na fase de treinamento, delimitados por UCL (limite de controle superior) e LCL (limite de controle inferior), e a média do sinal CL (reta central). Neste gráfico as operações da válvula com pontos verdes foram identificadas como sem cavitação e os pontos em vermelho como cavitação.

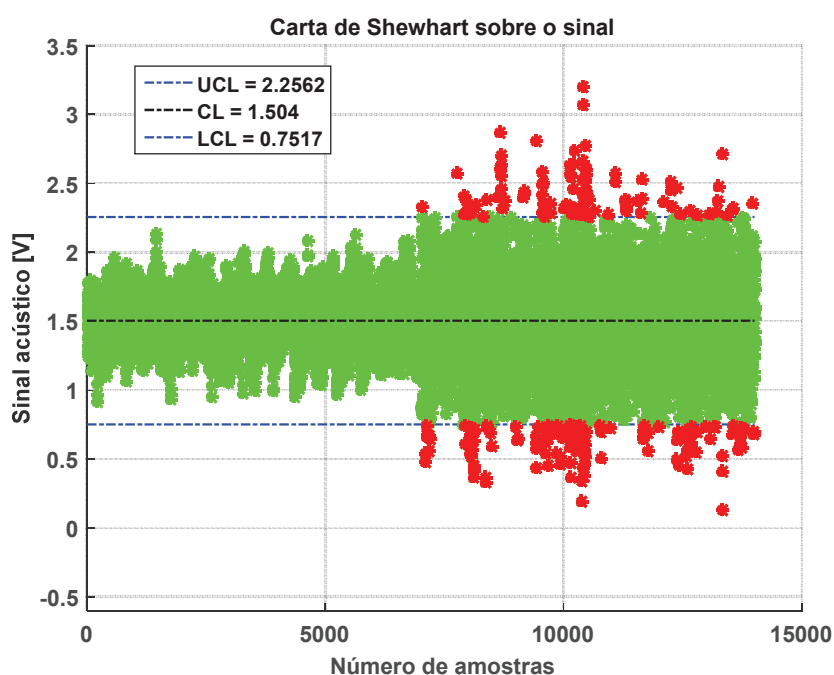


Figura 4.7 - Carta de Shewhart sobre o sinal.

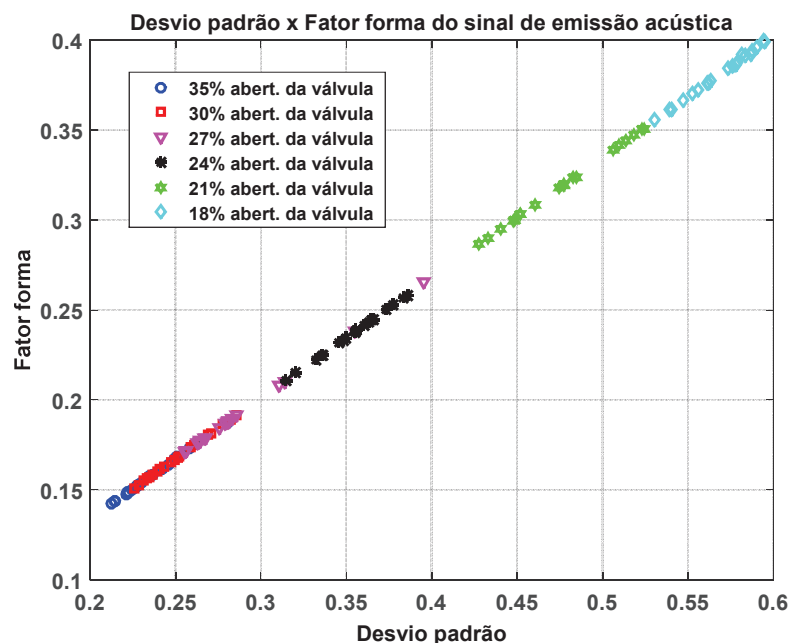


Figura 4.8 - Espaço característico do desvio padrão versus fator forma. Aberturas com 35 e 30% não possuem cavitação, e menores que 27% há presença de cavitação.

Na técnica usando SVM, foram treinados com os dados de desvio padrão e fator forma dois classificadores: um com a função *kernel* linear e outro com a RBF Gaussiana. Na Figura 4.8 são mostrados, para os dados de validação, os momentos utilizados nos classificadores: no eixo das ordenadas está o desvio padrão e no das abscissas o fator forma. Como pode ser observado, é possível obter uma boa separação dos dados com e sem cavitação com apenas uma reta. Note também que, como o fator forma é uma relação entre o desvio padrão e a média, e esta não tem variações significativas, como foi apresentado na Figura 4.5, a média se mostrou estatisticamente constante nas regiões com e sem cavitação, portanto, este fato explica o surgimento de uma reta no espaço característico apresentado na Figura 4.8.

Antes de iniciar os experimentos com o SVM, houve uma etapa de calibração, pois a função RBF Gaussiana, apresentada na Tabela 4.1, tem  $\sigma_k$  como parâmetro. Para esta função foi realizada uma busca otimizada deste de 0 a 15, em intervalos de 0,1 a fim de que a sua escolha maximizasse a acurácia (Equação 4.4).

No caso do uso da função linear não há necessidade deste tipo de calibração por não haver parâmetro a ser ajustado.

Os resultados gráficos das classificações são apresentados na Figura 4.9, onde, no espaço característico, são mostradas as regiões delimitadas pelas funções classificadoras.

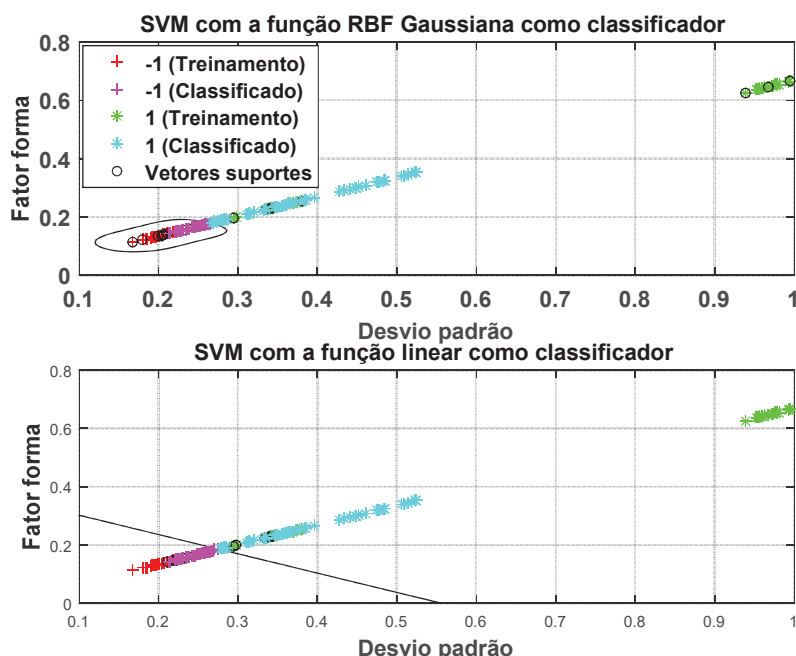


Figura 4.9 - SVM usando as funções classificadoras RBF Gaussiana e linear; ensaio variando abertura da válvula e fixa a frequência da bomba em 60 Hz.

Na RBF Gaussiana, vetores na região externa ao perímetro delimitado foram classificados como havendo cavitação e na função linear isto corresponde aos pontos acima da reta. Visualmente, houve um pequeno erro em ambas as abordagens, devido a uma superposição das regiões no espaço característico entre a operação da válvula em 30% de abertura (região sem cavitação) e em 27% de abertura (região de cavitação) que se encontra na fase incipiente do fenômeno.

No ensaio variando a frequência entregue à bomba (Figura 4.10), o SVM, com ambas as funções classificadoras, conseguiu classificar de forma correta todos os pontos, pois neste teste não houve superposição das regiões de transição de classes.

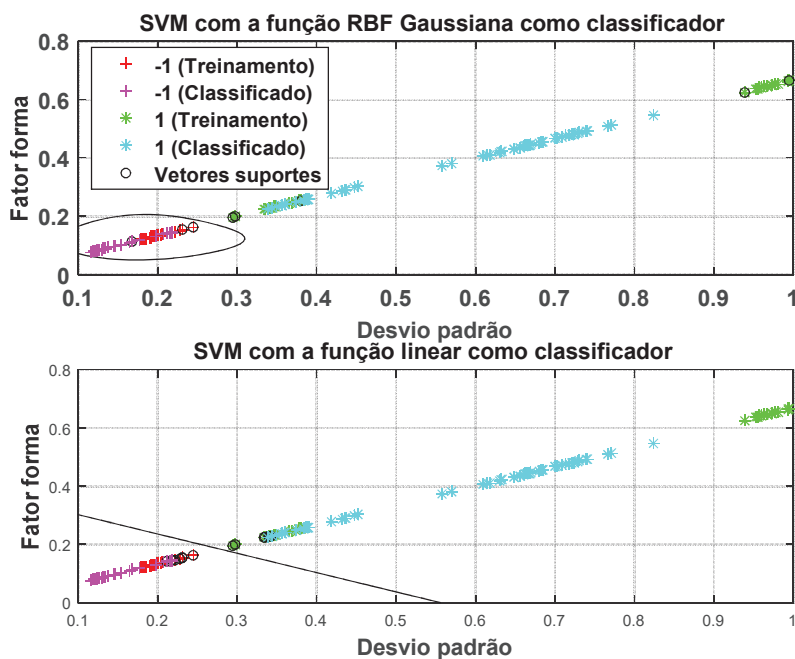


Figura 4.10 - SVM usando as funções classificadoras RBF Gaussiana e linear; ensaio variando a frequência entregue a bomba e abertura da válvula fixada em 10%.

#### 4.3.5 Comparação dos resultados

Na Figura 4.11 são exibidos os resultados para as métricas precisão e sensibilidade, onde é considerada a variação da abertura da válvula, e a frequência entregue à bomba é fixa. Em relação às cartas de Shewhart (CSs), a melhor precisão foi alcançada pelas CS sobre sinal de emissão acústica, sendo que com o aumento dos limites de controle estatístico houve uma pequena melhora nesta métrica. Isto não aconteceu para CS tipo S. Note que, a CS sobre o sinal teve singelo destaque em relação CS tipo S devido ao fato que houve pequena diminuição de FP com o aumento dos limites de controle.

O SVM, com ambas as funções classificadoras alcançou melhores resultados de precisão que a CS sobre o sinal, pois apresentou menores valores de FP. Por outro lado, na métrica sensibilidade, as CSs tiveram melhores resultados, pois tiveram FN nulo, ou seja, identificaram todas as vezes que acontecia cavitação. Nota-se que nas métricas F1 e acurácia (Figura 4.12), o SVM também alcançou melhores resultados. Portanto, mesmo tendo superposição nos espaços característicos, o SVM se destacou

neste ensaio sobre as CSs, no diagnóstico da cavitação através do sinal de emissão acústica.

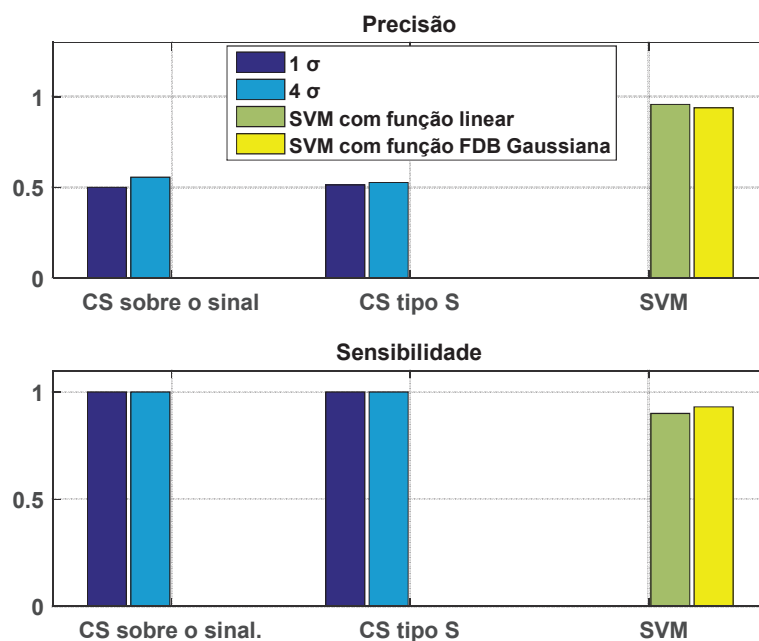


Figura 4.11 - Precisão e sensibilidade para CS e SVM para o ensaio onde a abertura da válvula variou e a velocidade da bomba foi fixada em 3460 rpm (60 Hz).

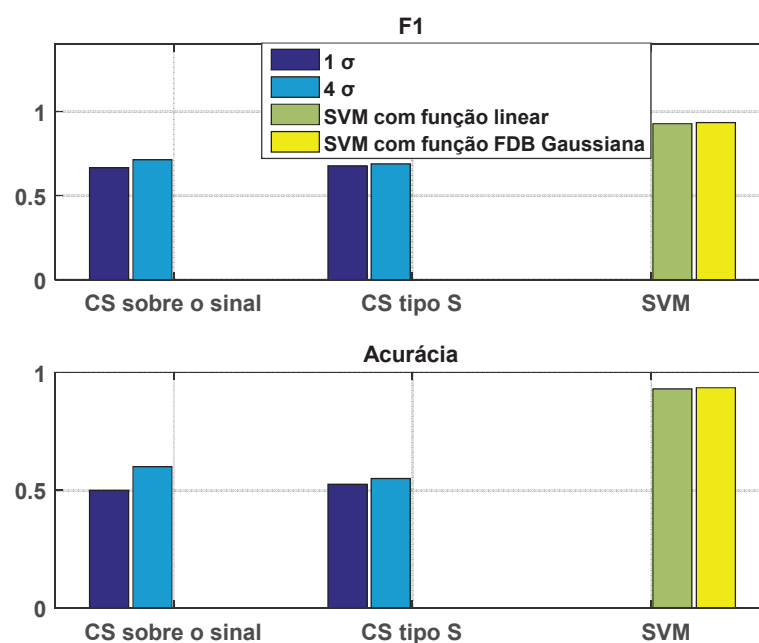


Figura 4.12 - Medida F1 e acurácia para CS e SVM para o ensaio onde a abertura da válvula variou e a velocidade da bomba foi fixada em 60 Hz.

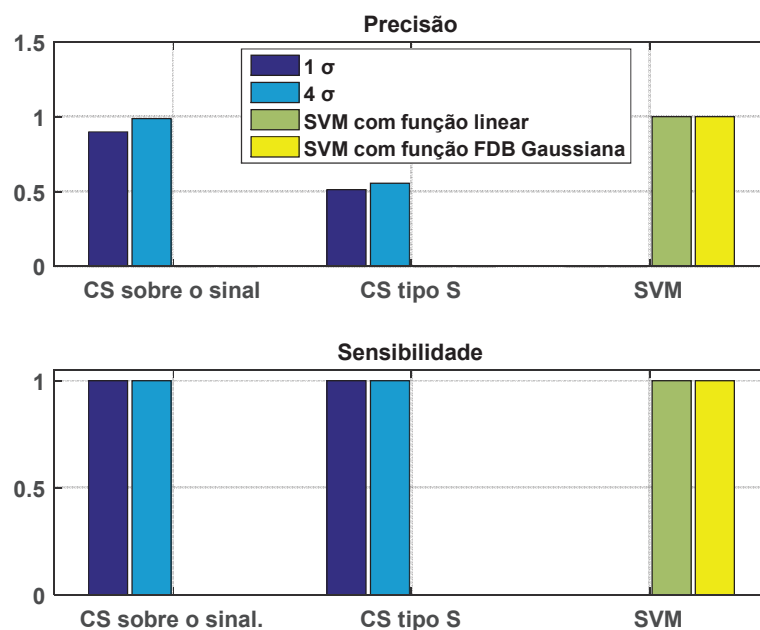


Figura 4.13 - Precisão e sensibilidade para CS e SVM para o ensaio onde a frequência entregue à bomba foi variada e a abertura da válvula fixada em 10%.

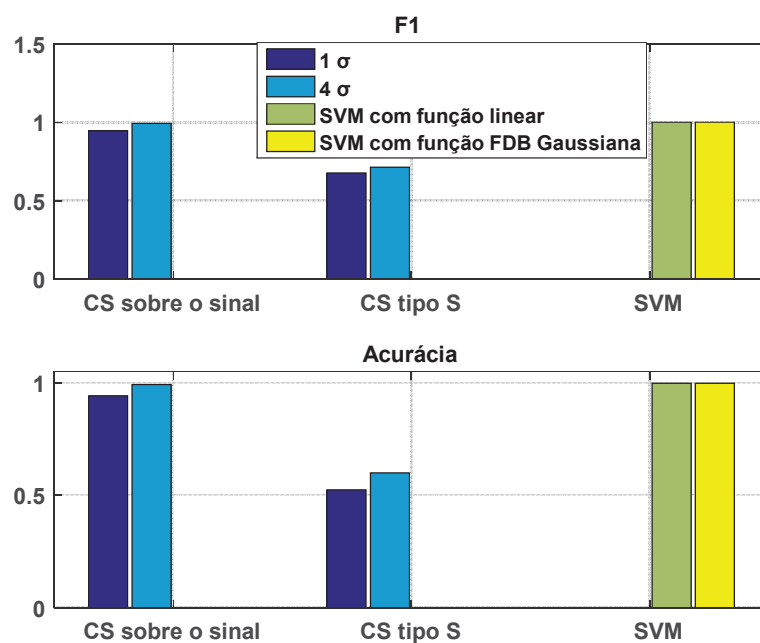


Figura 4.14 - Medida F1 e acurácia para CS e SVM para o ensaio onde a frequência entregue à bomba foi variada e a abertura da válvula fixada em 10%.

Analisando as Figuras 4.13 e 4.14, que consideram o ensaio que se faz variar a frequência entregue à bomba, percebe-se que os resultados da CS sobre o sinal, usando limite de controle de quatro desvios padrão, se aproximaram aos resultados do SVM em todas as métricas. Ambos conseguiram ausência de FN, e para FP o primeiro

apresentou 1,25% e o segundo o suprimiu. Neste sentido, pode-se afirmar que o monitoramento pela CS sobre o sinal de emissão acústica, por ser de fácil execução, é indicado ao monitoramento da cavitação quando se torna perceptível o fenômeno, provocando variação mais acentuada no desvio padrão, ou seja, na região onde o  $\sigma_c$  calculado fica abaixo de 2 (veja Figura 4.3, gráfico inferior, e Figura 4.10).

#### 4.4 Efeito da temperatura sobre a cavitação

Efetuuou-se novos ensaios em malha aberta, o primeiro com a água a 22°C, em temperatura ambiente, e o segundo com a água a 37°C; A bomba *booster* foi energizada na frequência nominal, 60 Hz, trabalhando em sua velocidade nominal 3460 rpm. Ambos os dados foram coletados em períodos de 50 segundos para cada ponto de operação da válvula em 70, 50, 40, 35, 30, 25, 20, 15 e 10% de abertura proporcionando um conjunto de 1.259.000 amostras para cada ponto de operação. Estes dados foram coletados para avaliar a variação do  $\sigma_c$  em função da temperatura. Os dados coletados a 22° C também serão usados nos testes do novo algoritmo proposto no Capítulo 5 para diagnóstico da cavitação.

##### 4.4.1 Influência da temperatura na intensificação do fenômeno cavitação

Visando estudar a influência da temperatura sobre o  $\sigma_c$ , calculou-se os seus valores, sobre os dados coletados, descartando as 20.000 amostras iniciais e finais, e o resultado destes cálculos está sendo apresentado na Figura 4.15. Nesta figura, nota-se que quando o ponto de operação está em 0,30 (30% de abertura da válvula) o  $\sigma_c$  calculado como a temperatura da água em 37°C fica mais próximo da região descrita como dano incipiente ( $\sigma_c \leq 2,30$ ) do que  $\sigma_c$ , calculado com a temperatura da água em 22°C. Neste sentido, percebe-se que se a temperatura do fluido muda para um valor maior, o risco de ocorrer cavitação é aumentado.

Este feito ocorre pelo fato de que a pressão de vaporização do fluido aumenta, e a queda de pressão na válvula tem um singelo aumento, tornando o gatilho de cavitação mais sensível às mudanças do ponto de operação em regiões críticas.

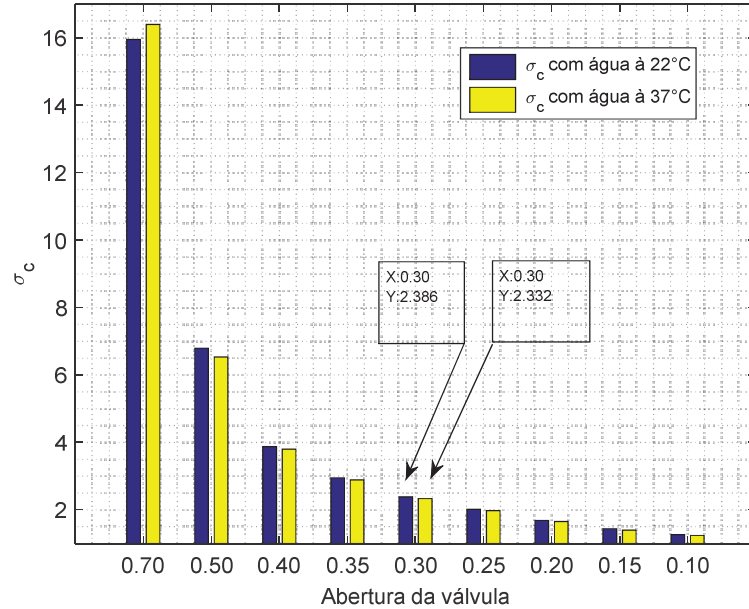


Figura 4.15 - Índice signa para cada ponto de operação com a válvula operando me malha aberta em duas temperaturas de trabalho.

Quando a válvula está quase totalmente aberta o efeito da temperatura sobre o valor  $\sigma_c$ , tem efeito contrário, ou seja, com pouca restrição a passagem do fluido e maior temperatura, o  $\sigma_c$  será maior. Para analisar este efeito considera-se a relação,

$$\frac{\sigma_c 37^\circ\text{C}}{\sigma_c 22^\circ\text{C}} = \frac{(P_{montante: 37^\circ\text{C}} - P_{vap 37^\circ\text{C}})}{(P_{montante: 22^\circ\text{C}} - P_{vap 22^\circ\text{C}})} * \frac{(P_{montante: 22^\circ\text{C}} - P_{jusante 22^\circ\text{C}})}{(P_{montante: 37^\circ\text{C}} - P_{jusante 37^\circ\text{C}})}. \quad (4.9)$$

Quando a válvula está em 70% de abertura, a média da pressão à montante estão próximas da média da pressão à jusante, em ambas as temperaturas, como a pressão de vaporização é maior para temperaturas maiores, na primeira parcela da Equação 4.9 o numerador é menor que o denominador, tornando está parcela menor que a segunda. Neste ponto de operação  $\sigma_c$  a 37°C se torna maior do que o  $\sigma_c$  a 22°C.

À medida que a válvula está sendo fechada a média da pressão à montante é aumentada e a média da pressão à jusante não sofre grandes alterações; quanto mais a válvula é fechada, a média das pressões à montante sofre maior influência da temperatura para o mesmo ponto de operação, a queda de pressão na válvula a 37°C passa a prevalecer em detrimento a situação de operação na temperatura a 22°C, a



parcela dois da Equação 4.9 se torna menor que a primeira. Portanto, à medida que a vazão é restringida  $\sigma_c$  à 22°C se torna menor do que  $\sigma_c$  à 37°C. Esta análise é apresentada na Figura 4.16.

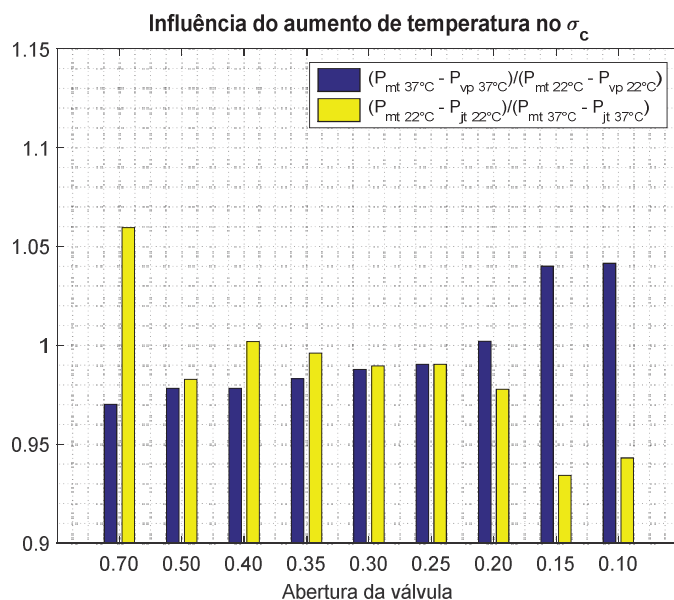


Figura 4.16 – Influência da temperatura no cálculo do índice de cavitação  $\sigma_c$

## 5 DETECÇÃO DA CAVITAÇÃO PARA DIFERENTES REGIÕES DE OPERAÇÃO.

No Item 4.3.3 verificou-se que dentre os quatro momentos estatísticos, o desvio padrão e o fator forma foram sensíveis à cavitação, com variações maiores para o primeiro.

Na carta de Shewhart, o desvio padrão foi utilizado para definir o limiar para detecção da cavitação. Observa-se no gráfico superior na Figura 4.3 que o desvio padrão aparenta variar linearmente com a abertura da válvula em aberturas maiores de 21%. Portanto, o cálculo para estipular um limiar de decisão para detecção do escoamento cavitativo, depende também da abertura da válvula, se esta relação, entre estes dois sinais, não for considerada, pode resultar em limiares bastante conservativos que dificultem a detecção automática do fenômeno.

Em situações usuais, nas quais as válvulas estão instaladas, há dificuldade de se obter dados de emissão acústica em situações de cavitação, pois este é justamente o fenômeno que se quer evitar. Esta condição impediria o uso do método SVM utilizado no Capítulo 4, pois não seria possível ter dados de ambas as classes (normal e cavitação).

Neste Capítulo, considera-se a válvula operando na região de normalidade, com o sinal de emissão acústica sendo coletado junto com a informação da abertura da válvula, que usualmente é disponível. Com isso, uma nova proposta para detecção de cavitação usando estes dados será feita.

### 5.1 Coleta de dados em uma malha de controle de vazão

Usando as mesmas disposições dos transdutores na planta piloto descritas nos ensaios anteriores, a válvula de controle foi utilizada como atuador na malha de controle de vazão, usando para isto um controlador proporcional e integral (PI).

A abertura da válvula foi coletada com frequência de amostragem de 4 Hz pelo Matlab via OPC (*Object linking and embedding for process control*) toolbox e armazenada em arquivo do Matlab (Figura 5.1).

O sinal de emissão acústica foi coletado via placa de aquisição de dados do fabricante Dspace, com uma frequência de amostragem de 20 kHz, condicionado em  $\pm 10$  V. Os ensaios foram executados com a água em temperatura ambiente, 22°C e a velocidade da bomba usada foi a nominal. A referência de vazão foi ajustada em 55, 50, 45, 42, 45 e 50 dm<sup>3</sup>/mim, com mudanças a cada 30 segundos.

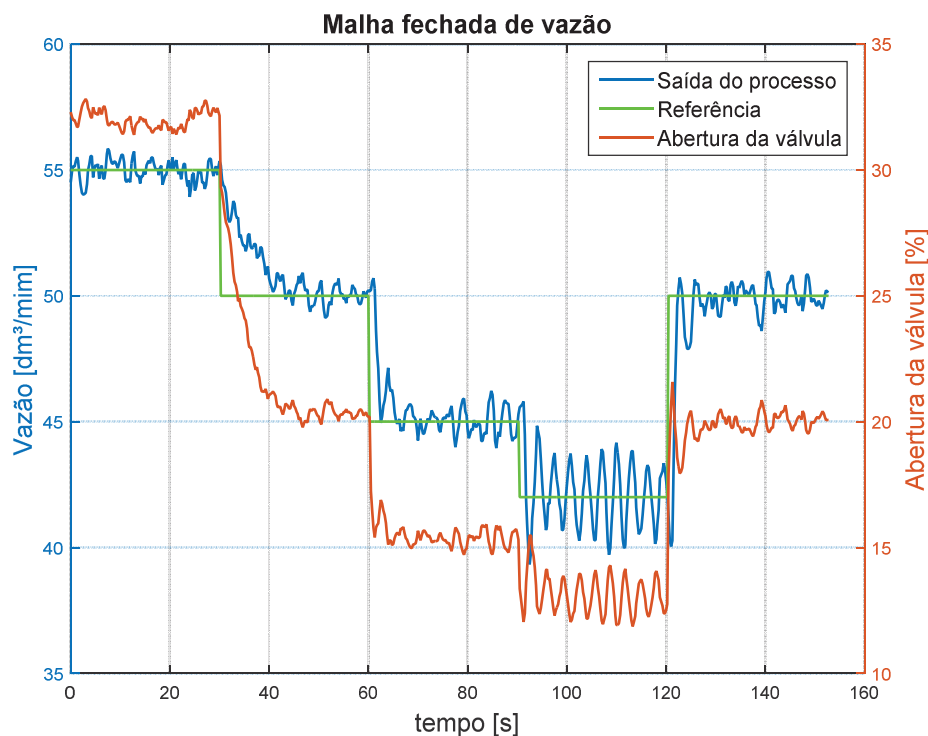


Figura 5.1 - Malha de vazão para diferentes referências com controle via válvula

Na Figura 5.1, nota-se que a vazão teve certa variação em torno do valor da referência em todas as mudanças de referência, mas apresentou uma oscilação acentuada quando ela foi ajustada em 42 dm<sup>3</sup>/mim, causada pela oscilação da abertura da válvula, devido ao aumento na dificuldade do controlador PI ajustado intervir na malha. Neste ponto de operação a abertura da válvula está, em média, em 13% de abertura e o fenômeno de cavitação se apresenta acentuado, perceptível através do sinal de emissão acústica, apresentado no gráfico inferior da Figura 5.2.

KIM, *et al.*( 2013, p. 12) descrevem uma relação fortemente não linear e progressiva entre a velocidade do fluido e a queda de pressão na região de *vena contracta*. Sendo a vazão do fluido atrelada a sua velocidade, a não linearidade estará

nela presente e é retransmitida a entrada do controlador, o que pode ajudar a explicar a oscilação intensa nesta região de operação.

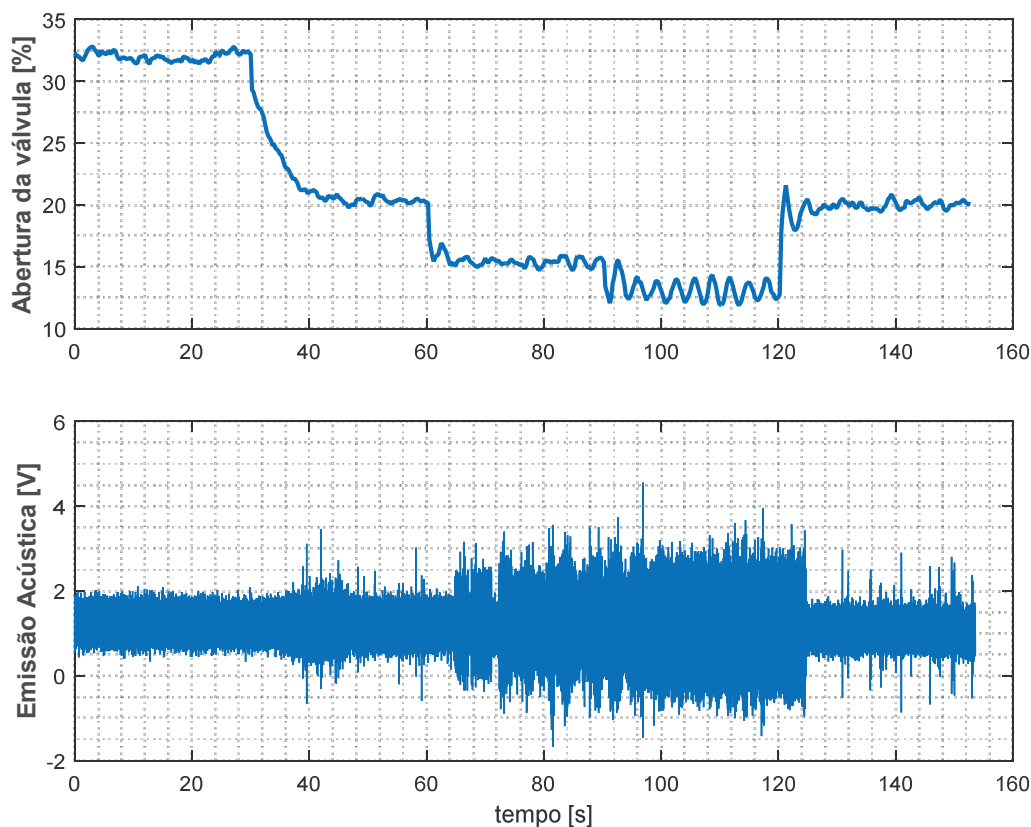


Figura 5.2- Monitoramento dos sinais de EA e abertura da válvula com o processo operando em malha fechada.

Uma mudança nas características da EA é mais pronunciada entre 65 a 125 segundos, no gráfico inferior da Figura 5.2.

Para representar melhor a região normal de operação, ou seja, sem cavitação, os dados de EA e abertura da válvula coletados no ensaio de malha aberta a 22° C apresentado no Item 4.4, foram adicionados aos dados do presente teste.

Na Figura 5.3 é apresentada a variação do desvio padrão da EA em função da abertura da válvula, ambos calculados com dados de 5 segundos de operação. Observa-se que para valores de abertura menores que 20%, a relação entre as duas variáveis tem um comportamento diferente daquele para aberturas maiores que 20%.

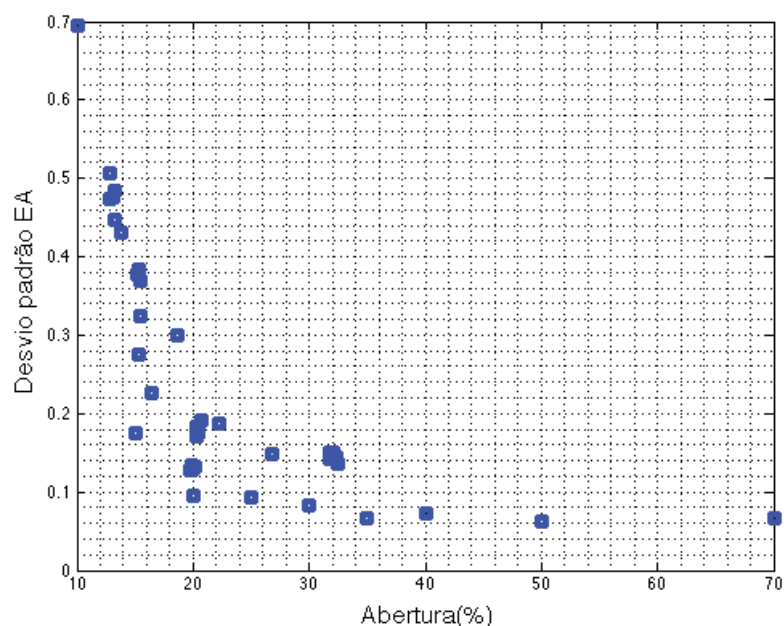


Figura 5.3 - Relação entre abertura e desvio padrão da EA.

Um modelo que relaciona o desvio padrão da EA e a abertura da válvula é então ajustado para aberturas maiores que 20%, considerada uma região de maior linearidade.

Na fase de treinamento, calcula-se através do método dos mínimos quadrados os coeficientes da reta a ser ajustada aos dados da Equação 5.1, recebendo como dados de entrada a média da abertura da válvula (variável independente) e o desvio padrão (variável dependente), calculados no período de 5 segundos, e o tipo de função de regressão usada. A saída da função fornece os coeficientes da Equação 5.1 e também os limites destes, (com intervalo de confiança de 95% - padrão).

$$Y(A) = p_1 A + p_2 \quad (5.1)$$

onde  $Y$  é o desvio padrão da emissão acústica,  $A$  é a abertura da válvula e  $p_1$  e  $p_2$  são os coeficientes obtidos, sendo  $p_1 = -0,00245$  e  $p_2 = 0,2065$ . A reta ajustada aos dados de normalidade e seu intervalo de confiança calculado são apresentadas na Figura 5.4.

Na fase de detecção, usa-se o modelo de regressão linear obtido e os novos valores da média da abertura da válvula e do desvio padrão, para o novo período de 5 segundos. Faz-se a predição usando este modelo, calcula-se o erro de predição, e

estima-se os limiares estatísticos (com intervalo de confiança de 95% - padrão) em torno desta reta.

Para maiores detalhes sobre os cálculos dos limiares estatísticos da reta ajustada através da regressão linear simples e dos limiares de predição consultar MENDENHALL e SINICICH (2011, p. 91-132)

Se os valores de desvio padrão para a abertura fornecida estão fora deste limiar, considera-se que há cavitação.

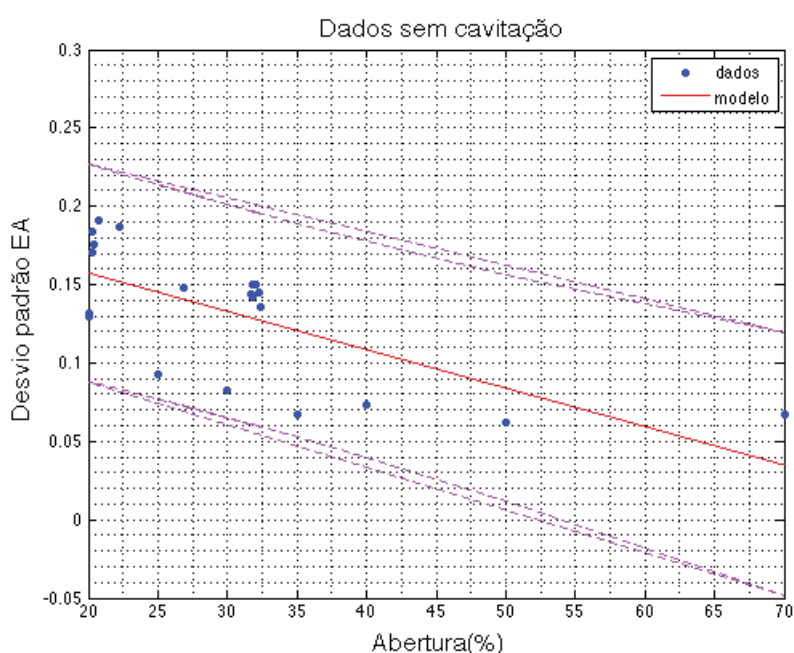


Figura 5.4 - Modelo ajustado via regressão linear e intervalo de confiança.

Na Figura 5.5 são mostrados todos os dados utilizados, para todas as aberturas da válvula, portanto com e sem cavitação. O intervalo de confiança do modelo obtido delimita os valores de desvio padrão da EA para os quais não há cavitação.

Apenas para valores de abertura menor que 20% (15 e 16%) foi indicada cavitação, uma vez que a maioria dos desvios padrão da EA ficou fora do intervalo de confiança.

Observa-se que o modelo obtido admite valores maiores de desvio padrão da EA a medida que a abertura da válvula diminui, resultando no limiar que se adapta a diferentes regiões de operação da válvula.

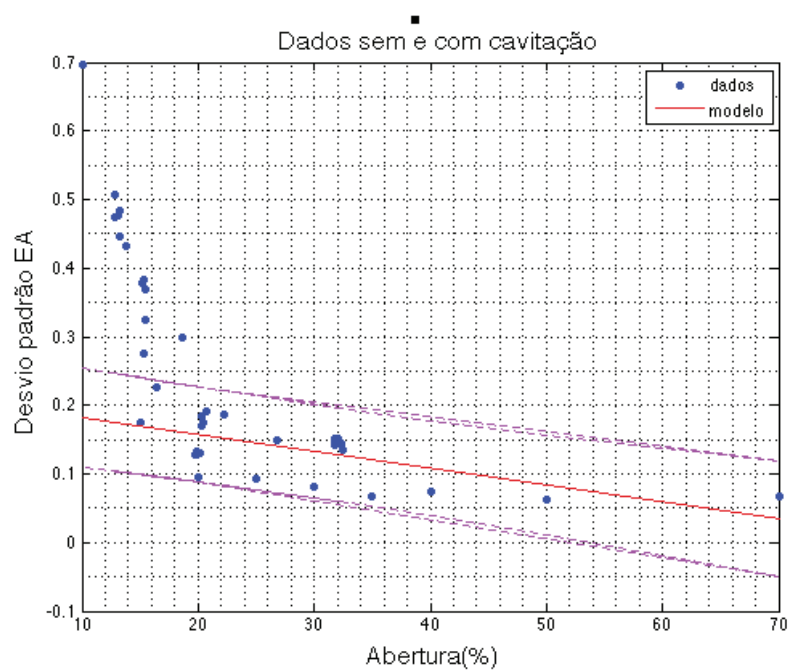


Figura 5.5 - Avaliação do uso do modelo e de seu intervalo de confiança para detectar cavitação

Pelo que é apresentado no gráfico da Figura 5.5 é notório que a reta, mais os intervalos de confiança calculados, formam um parâmetro de decisão que assegura um tratamento estatístico para o diagnóstico, mesmo com a dificuldade inicial de se propor um limiar de decisão constante. .

Deve-se notar que o monitoramento está sendo efetuado em um período de tempo de 5 segundos e considerando que o material dos internos da válvula ensaiada é Stellite, nome comercial da liga metálica, o tempo de incubação para este material é de aproximadamente 3 horas, para materiais de aço carbono (ferro) o tempo de incubação é de aproximadamente 2 horas, portanto a detecção ocorrerá de forma precoce, muito antes que a cavitação saia de seu período de incubação.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um descritivo sobre o fenômeno de cavitação, visando conhecê-lo a fim de que se possa diagnosticá-lo automaticamente. Para realizar a pesquisa, foi utilizada uma planta piloto da qual foram avaliados os momentos estatísticos dos sinais de emissão acústica e de pressão a jusante da válvula presente na planta. Como resultado, foi observado que o desvio padrão e o fator forma do sinal de emissão acústica apresentaram boa sensibilidade à presença de cavitação. No entanto, sabendo que o fator forma é uma relação do desvio padrão pela média e que a média não apresentou nenhuma sensibilidade, percebeu-se que o monitoramento pode ser feito apenas pelo desvio padrão.

Estabelecidas as características relevantes para a identificação de cavitação e com os dados em malha aberta, quatro métricas de desempenho foram utilizadas para comparar o desempenho das cartas de Shewhart (sobre o sinal e sobre o desvio padrão do sinal), com o algoritmo do SVM (sobre o desvio padrão e o fator forma). Com a cavitação originada variando a abertura da válvula, o SVM foi superior na precisão, F1 e acurácia. A diferença entre a carta de Shewhart para o sinal e para a de desvio padrão foi muito pequena. Ao se variar a frequência da bomba com a válvula fixa em 10%, a carta de Shewhart sobre o sinal teve desempenho bastante similar ao SVM para todas as métricas. A carta de Shewhart sobre o desvio padrão teve desempenho ligeiramente inferior em três das métricas. Assim, conclui-se que os resultados do SVM são mais confiáveis do que os obtidos com as cartas de Shewhart, uma vez que os resultados do SVM foram melhores ou similares nos dois casos.

Apesar disto, a carta de Shewhart sobre o sinal resulta em uma alternativa mais simples para o monitoramento, com resultados não muito inferiores ao SVM. Destaca-se ainda que o SVM requer dados com e sem cavitação para o treinamento, sendo que dados de cavitação nem sempre estão disponíveis em uma planta industrial, pois é justamente o que se quer evitar.

Também se explorou o potencial do desvio padrão amostral do sinal de emissão acústica através de um algoritmo que não necessite de dados de cavitação para ser modelado. Como informação auxiliar para este algoritmo foi utilizado o sinal da



posição de abertura da válvula, já que este não é um dado de difícil obtenção num processo industrial e porque existe um forte relacionamento linear entre essas duas variáveis.

O algoritmo testado se baseia no cálculo da regressão linear simples e seus intervalos de confiança, de forma a propor um limiar estatístico capaz de diagnosticar o fenômeno. Com o teste sobre os dados em malha aberta e fechada, mudando a abertura da válvula, o algoritmo foi capaz de identificar o escoamento cavitativo devido ao posicionamento dos pontos calculados sobre os dados de entrada que estão fora dos limites calculados.

Como trabalhos futuros previstos, aprimorar o algoritmo proposto através de mais testes e pesquisa, estudar a possibilidade que estas variáveis selecionadas possam ser usadas como parâmetro de entrada em um dispositivo portátil capaz de diagnosticar a cavitação de forma rápida e eficiente. Aplicar a ferramenta matemática descrita com Wavelets para analisar o sinal de emissão acústica.

## 7 BIBLIOGRAFIA

BODDÉUS, K. S. **Cavitation in valves**. Wollongong: Thesis to doctor of philosophy in engineering from the university of wollongong, v. 1, 1999. Disponível em: <<http://ro.uow.edu.au/theses/1574/>>. Acesso em: 2015.

BOSER, B. E.; GUYON, I. M.; VAPNIK, V. N. **A training algorithm for optimal margin classifiers**. COLT '92 Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory. New York: [s.n.]. 1992. p. 144-152.

BO-SUK, Y. et al. Cavitation detection of butterfly valve using support vector machines. **Journal of Sound and Vibration**, p. 25-43, 2005.

BURGES, C. J. C. A Tutorial on support vector machines for pattern recognition. **Data Mining and Knowledge Discovery**, 2, p. 121-167, 1998.

DESANTES, J. M. et al. Measurements of spray for the study of cavitation in diesel injection nozzles. **Sociedade of Automotive Engineers, inc**, 2003. ISSN 2003-01-0703. <http://papers.sae.org/2003-01-0703/>.

FACELI, K. et al. **Inteligência artificial: Uma abordagem de máquina**. São Paulo: LTC-2011, 2011.

FELDMAN, R. M.; FLORES, C. V. **Applied Probability and Stochastic Processes**. Second Edition. ed. New York: Springer, 2010.

FISHER CONTROLS INTERNATIONAL LLC. **Control Valve Handbook**. [S.l.]. 2005.

FRANC, J.-P.; JEAN-MARIE, M. **Fundamentals of cavitation**. [S.l.]: Springer, v. 76, 2004. 28 p.

HUBBALLI, B. V.; SONDUR, V. B. A review on the prediction of Cavitation erosion inception in hydraulic control valves. **International journal of emerging technology and advanced engineering**, v. 3, january 2013. Issue 1.

KIM, K.-H. et al. **Advanced experimental and numerical Techniques for cavitation erosion**. Saint Martin d'Hères Cedex: Springer, v. 106, 2013. 6 p.

MENDENHALL, W.; SINCICH, T. **A second Course in Statistics Regression Analysis**. Seventh. ed. Florida: Pearson Education, 2011. 104-132 p.

MONTGOMERY, C. D.; RUNGER, C. G. **Applied statistics and probability for engineer**. third edition. ed. [S.l.]: John Wiley & Son, inc, 2002. 595-612 p.

NURICK, W. H. Orifice cavitation and its effect on spray mixing. **Jornal of fluids engineering**, v. 98, p. 681-687, 1976.

PLATT, C. J. **Advances in kernel methods support vector learning**. Massachusetts: The MIT Press Cambridge, 185-208 p. ISBN 0-262-19416-3.

SCHÖLKOPF, B.; SMOLA, A. J. **Learning with kernels - support vector machines, regularization, optimization, and beyond**. London: The MIT press Cambridge, 2002. ISBN 0-262-19475-9.

SCHÖLKOPF, B.; BURGESS, C. J. C.; SMOLA, A. J. (Eds.). **Advances in Kernel Methods Support Vector Learning**. Massachusetts: MIT Press, 1999.

SHUKRI, I. N. B. M.; MUN, G. Y.; IBRAHIM, R. B. A study on control valve fault incipient detection monitoring system using acoustic technique. **IEEE Xplore**, Shanghai, 2011. 11975511.

ULANICKI, B.; PICINALI, L.; JANUS, T. Measurements and analysis of cavitation in a pressure reducing valve during operation - a case study. **ScienceDirect**, p. 270-279, 2015.

VAPNIK, V. N. **The nature of statistical learning theory**. second. ed. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2000. 140-141 p.

WAGNER, J.; BURGEMEISTER, J. Piezoelectric Accelerometers: Theory and Application. **MMF**, 2012. Disponível em: <<http://www.mmf.de/manual/transducermane.pdf>>. Acesso em: mar. 2016.